

城市轨道交通 CPSS 平台构建研究

董西松^{1,2} 沈震^{1,3} 熊刚^{1,3} 朱凤华^{1,3} 胡斌¹

摘要 城市轨道交通系统同时涉及工程复杂性和社会复杂性, 呈现动态性、开放性、交互性、自主性等特征, 是社会物理信息系统 (Cyber-physical-social system, CPSS) 的典型代表, 传统的仿真技术难以对其进行全面的研究和分析. 本文研究并构建了城市轨道交通 CPSS 平台 (包括物理系统模型、社会系统模型、Cyber 系统模型), 建立相应的计算实验平台和综合评估系统, 描述其详细功能. 通过 CPSS 平台可进行各种极限和常规实验, 对城市轨道交通在正常情况下的评估优化和在突发事故下的应急管理进行研究, 提高对城市轨道交通的建模、评估、分析和优化能力, 还可为运行方案评估与规划、城市轨道交通设计、应急预案评价与优化、人员培训等方面提供技术支持.

关键词 城市轨道交通系统, 社会物理信息系统, 计算实验, 交通仿真, 应急管理

引用格式 董西松, 沈震, 熊刚, 朱凤华, 胡斌. 城市轨道交通 CPSS 平台构建研究. 自动化学报, 2019, 45(4): 682–692

DOI 10.16383/j.aas.2018.c180269

Construction of CPSS Platform of Urban Rail Transit System

DONG Xi-Song^{1,2} SHEN Zhen^{1,3} XIONG Gang^{1,3} ZHU Feng-Hua^{1,3} HU Bin¹

Abstract The urban rail transit (URT) involves engineering complexity and social complexity simultaneously, and presents such characteristics as dynamicity, openness, interaction, and autonomy. It is a typical representative of cyber-physical-social system (CPSS) and is difficult to be researched and analyzed by traditional simulation technologies. This paper intends to study and construct a CPSS platform of URTs (CPSS-URT), which includes physical system model, social system model, and cyber system model, as well as its corresponding computational experiment platform, and a comprehensive evaluation system. Then, its functions are described in detail. The CPSS-URT can carry out various limit and routine experiments, for evaluation and optimization of URTs under normal conditions and the emergency management under sudden accidents, so as to improve the ability to model, evaluate, analyze, and optimize URTs. It can also provide technical supports for evaluation and planning of operational programs, URTs' design, evaluation and optimization of emergency plans, and personnel training.

Key words Urban rail transit system, cyber-physical-social system (CPSS), computational experiments, traffic simulation, emergency management

Citation Dong Xi-Song, Shen Zhen, Xiong Gang, Zhu Feng-Hua, Hu Bin. Construction of CPSS platform of urban rail transit system. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(4): 682–692

城市轨道交通因其快速、安全、准时、环保、全天候、大运量等优点, 已经成为世界各大城市发展公

共交通的首选^[1]. 据中国城市轨道交通协会信息, 截至 2017 年底, 中国内地累计有 34 个城市建成投运城轨线路 5 021.7 km, 2017 年新增 33 条运营线路、868.9 km 运营线路长度^[2].

城市轨道交通系统是一个天然的多学科、跨领域的复杂巨系统 (不可还原, 不可拆分, 不可确定), 受到社会、经济、环境以及参与系统的人员的影响, 涉及几乎所有工程科学以及经济、人口、资源和气候等社会科学, 整个城市轨道交通系统及外围因素错综复杂, 必须将人和社会因素纳入到城市轨道交通系统的控制和决策中综合考虑^[3]. 而对实际轨道交通系统进行实验往往受经济、道德和法律等约束, 传统的仿真技术往往只注重局部、变相、具体、简化、单向、独立的演示对象的特性, 难以综合考虑巨系统的错综复杂的工程和社会学因素, 且对整个城市轨道交通综合运营和管理方面考虑较少, 不能进行较为全面准确地评估. 如何寻找可行的方案进行全面

收稿日期 2018-05-01 录用日期 2018-08-04
Manuscript received May 1, 2018; accepted August 4, 2018
国家重点研究发展计划 (2018YFB1004803), 国家自然科学基金 (617 73381, 61773382, 61533019), 广东省科技厅项目 (2017B090912001) 资助

Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFB1004803), National Natural Science Foundation of China (61773381, 61773382, 61533019), and Guangdong's Science and Technology Project (2017B090912001)

本文责任编辑 董海荣
Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong

1. 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, 北京市智能化技术与系统工程研究中心 北京 100190 2. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266113 3. 东莞中国科学院云计算产业技术创新与育成中心 东莞 523808

1. State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266113 3. Cloud Computing Center, Chinese Academy of Sciences, Dongguan 523808

研究和分析, 成为研究者们面临的重大问题。

本文综合考虑运行环境、社会环境、人员、规则、设备、信息处理等工程和社会因素, 提出构建城市轨道交通的社会物理信息系统 (Cyber-physical-social system, CPSS) 平台, 以真实反映实际系统行为规则、动态响应、极限状态等, 建立相应的计算实验和综合评估系统, 描述其功能, 并给出具体的案例。通过该平台, 可进行各种极限和常规实验, 实现对城市轨道交通系统的运行方案评估与规划、安全因素评估、应急措施评估与优化等功能, 提高对城市轨道交通这类复杂系统的建模、评估、分析和优化能力。城市轨道交通 CPSS 平台的研究不仅是综合交通运输发展的需要, 而且是节省社会资源、提高服务能力、优化运输系统设计和过程的必然。

1 相关工作综述

1.1 城市轨道交通仿真的国内外研究现状

随着计算机、通信的快速发展, 轨道交通仿真软件在铁路规划、设计与管理领域得到了广泛应用^[4-15]。ADAMSrail 可建立机车车辆的虚拟样机模型并执行相应的分析^[4]。瑞典皇家技术学院开发的 OpenTrack 可以对列车时刻表进行优化^[5]。RailSys 可用于各种规模铁路网络的分析、设计和优化^[6]。UTRAS 可进行列车运行计算、列车模型对运营的影响分析、延误恢复及分析、不同通信信号制式的影响分析、多列车运行能力及效果的评价等。RailPlan 可根据线路基础数据和列车牵引数据来模拟列车的运行。Dynamis 可进行牵引计算。VISION 可快速、高效地分析列车间隔和线路能力。LOGSIM 可用于时刻表, 列车运行实时调度等问题。RAILSIM 可精确地模拟任何铁路系统中的任何车辆的运行。RAILSTM 用于评价线路能力、理论能力和实际能力。RailPlanTM 是一个基于线路与城市轨道交通基础数据的运输组织仿真系统。TOM 可评估行车时刻表、车辆能耗、供电系统和列车控制系统等性能。Villon 可用于物流节点-货运站的规划、设计与评价等。ABAQUS 软件可用于强度和疲劳性的分析。SimPed 和 Nomad 将枢纽服务水平评价与行人流特征联系, 针对轨道交通枢纽的行人流特征进行了仿真建模。

在国内, 北京交通大学、西南交通大学、同济大学、铁道科学研究院等高校和研究机构也取得了许多成果。西南交通大学电气工程学院与广州地下铁道设计研究院共同开发了针对城市轨道交通牵引供电仿真的 SimSystem 软件, 并已在广州市地下铁道设计研究院投入使用, 效果良好。北京交通大学与香

港理工大学合作研发的列车运行计算系统通用列车运行模拟系统 (General purposed train movement simulation system, GTMSS) 是我国自主研发的新一代综合模拟系统, 可提供各种条件下系统相关指标的自动计算, 提供铁路工程项目新建或改造过程中的多方案比选、机车运行操作方案的优化、列车运行过程的动态演示等功能。

传统的轨道交通仿真系统建立在数学模型和对实际系统的假设之上。由于传统仿真对建模的精确性或计算的简洁性的要求, 往往对真实系统各方面因素进行精简, 在真实性方面有所缺失, 对系统的描述比较局部和有限, 且传统的轨道交通仿真系统局限于对单一问题的求解, 大大限制了研究结果的实用性和有效性^[16]。再者, 从研究范围来讲, 传统仿真系统只能模拟实际系统的一部分或体现工程方面的局部特性, 几乎没有考虑环境、经济、社会等因素, 也没有考虑交通与人、自然、社会的相互影响^[16]。所以, 要想得到最切合实际的仿真结果, 一个真实的能考虑到实际系统各方面因素的仿真系统是必不可少的。

1.2 CPS 和 CPSS 的国内外研究现状

美国于 2007 年提出的信息物理系统 (Cyber-physical system, CPS) 是以工程为主、包含人在系统或回路的一类复杂系统, 正在成为全球研究热点^[17-20]。美国科学基金会 NSF 先后资助 CPS 基础理论、方法工具、平台系统等方面的 500 多个研究项目¹, 并逐步将 CPS 研究成果应用于交通、国防、能源、医疗等领域, 取得了很好的应用效益。IBM 提出的智慧地球是对 CPS 应用实践的战略构想。2013 年德国工业 4.0 实施建议将 CPS 作为工业 4.0 的核心技术^[18]。欧盟启动的 ARTEMIS5 等重大项目也将 CPS 作为一个重要研究方向。韩国、日本等许多亚洲国家也开始重视 CPS 的研究, 并提供资金支持。最近, 出现了 *IET Cyber-Physical Systems Theory and Applications*, *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems* 等多个 CPS 学术期刊。

CPS 的研究也在国内逐步兴起。2010 年科技部启动了面向信息物理融合的系统平台等 863 计划项目。2016 年 9 月, 中国电子技术标准化研究院联合国内百余家企事业单位发起成立信息物理系统发展论坛。2017 年 3 月, 中国电子技术标准化研究院发布《信息物理系统白皮书 (2017)》。《中国制造 2025》提出基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革。《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》提出构建信息物理系统参考模型和综合技术标准体系, 建

¹<http://cps-vo.org/projects>

设测试验证平台和综合验证试验床, 支持开展兼容适配、互联互通和互操作测试验证。

但是, 针对 CPS 系统的现有研究还主要集中在工程复杂性要素, 或社会复杂性要素的一个方面。而在 CPS 系统中, 人往往是设计者、建造者、运营管理者 and 最终使用者, 人等社会复杂性要素在系统各个阶段都起着不可忽视甚至是决定性的重要作用, 要实现 CPS 安全可靠高效的管控和应用目标, 工程复杂性要素和社会复杂性要素必须作为不可分割的、地位平等的整体加以研究。上述复杂系统向全要素综合集成和深度智慧方向不断发展, 将产生越来越多的复杂、巨型的社会信息物理系统 (Cyber-physical-social system, CPSS)^[21]。

CPSS 是由物理系统 (Physical system)、相关人和社会系统 (Social system)、连接二者的信息系统 (Cyber system) 共同构成的一类通用复杂系统, 通过传感器网络实现物理系统和 Cyber 系统的连接, 通过社会传感器网络实现社会系统和 Cyber 系统的连接, 这样物理 + 社会系统就能够等价地映射到 Cyber 系统中 (见图 1)。在此基础上, 通过 CPSS 中 Cyber 系统和物理 + 社会系统的彼此认识、虚实互动、共同提高, 循序渐进地实现 CPSS 安全、可靠、高效运行等管控和应用目标^[21]。CPSS 在 CPS 的基础上, 进一步纳入社会信息, 将研究范围扩展到社会网络系统, 在智能企业、智能交通、智能家居、智能医疗等领域得到多方面应用^[22-27]。当前, 研究社会环境下信息物理系统的行为分析与调控已经成为多个国家重大战略领域的共同需求, 研究 CPSS 已成为国家自然科学基金委员会十三五规划内容, 也成为多个国家重大战略领域的共同需求。

1.3 CPS 和 CPSS 在交通领域的研究现状

在交通 CPS 和 CPSS 相关的研究领域, IEEE ITS 会刊在 2014 年组织了基于社会信号的实时社会交通 (Real-time social transportation with on-line social signals)、计算交通和交通 5.0 (Computational transportation and transportation 5.0)、社会交通中的交通博弈 (Transportation games for social transportation) 专题讨论。基于社会媒体的新一代智能交通系统 Transportation 5.0 也已提出^[28-29]。基于大数据的城市交通系统的研究也取得了很大进展^[30]。Guo 等^[24] 研究交通领域信息物理系统 (CPS-ITS) 的感知、通信、计算、控制和应用 5 个层次以及向 CPSS 发展的趋势。Pereira 等^[31] 通过交通卡数据、手机运营商数据, 以及社交媒体上相关的交通事件和交通热点, 研究提取交通异常人群, 预测流动规律。He 等^[32] 提出采用手机数据、公交卡等社会性信号来采集交通需求、预测交通拥堵及

查找拥堵源头, 为交通出行者发布最短交通路径和最快交通路径等诱导信息。汪治华等^[33] 提出了分层式的交通信息物理系统模型结构。Wang 等^[34] 研究了 CPSS 在汽车自动驾驶中的应用。综上所述, 基于 CPS/CPSS 的城市交通处于智能交通系统应用的研究前沿。CPS, 尤其是 CPSS, 已经成为国内外研究热点。但是, 专门针对轨道交通系统的相关研究还很少见。

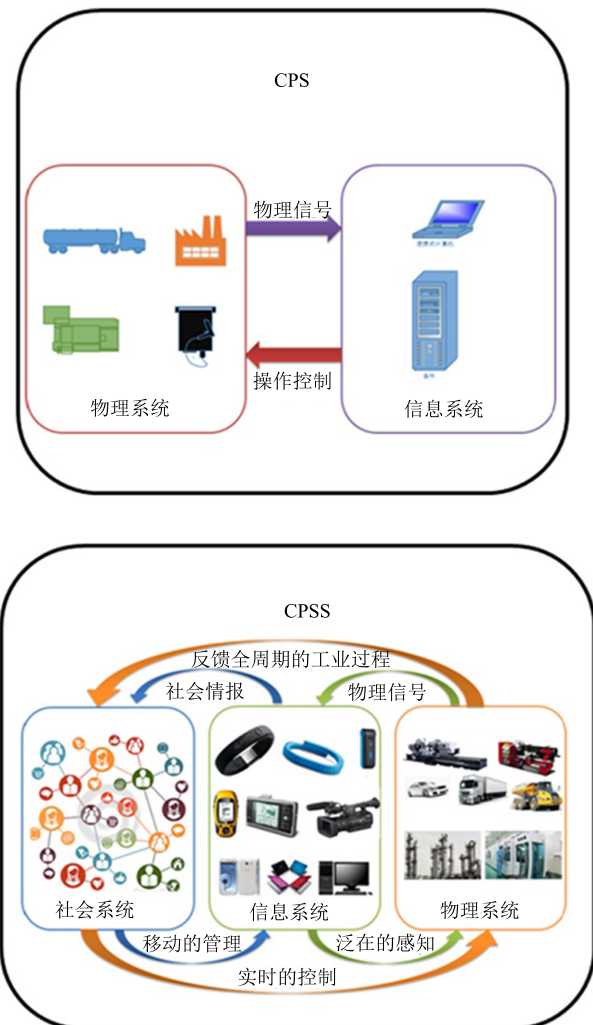


图 1 信息物理系统 (CPS) 和社会信息物理系统 (CPSS)
Fig. 1 Cyber-physical-system (CPS) and cyber-physical-social system (CPSS)

2 城市轨道交通 CPSS 平台研究内容及方案

本文构建通用的城市轨道交通 CPSS 平台, 对城市轨道交通正常情况下的运营管理和非正常情况下的应急管理进行计算实验研究 (见图 2)。

城市轨道交通 CPSS 平台整体研究路线如图 3 所示。自下而上分为基础构建层、数据知识层、计算

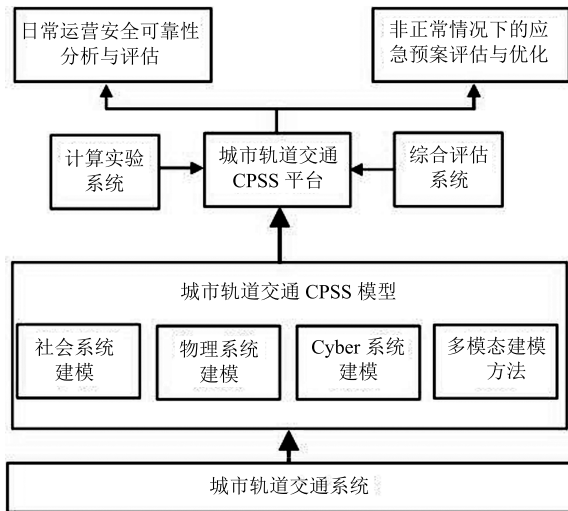


图 2 城市轨道交通 CPSS 平台基本框架系
Fig. 2 The basic framework of CPSS-URT

试验和综合评估四部分。其中数据知识层包括建立各种数据库、知识库、场景库、方案库、知识库以及各种设备 Agent、环境 Agent、人员 Agent、规则标准等, 计算实验层包括实验设计、实验执行、实验分析和实验结果驱动, 综合评估层采用专家经验、定性加定量和模糊等评估方法对 CPSS 平台和实际系统在正常情况下的评估优化和在突发事故下的应急管理进行研究。

2.1 城市轨道交通 CPSS 模型

2.1.1 城市轨道交通中社会系统模型

1) 构建基于移动社交网络 (Mobile social network, MSN) 的交通信息采集平台, 包含手机信令系统的数据采集、交通舆情分析等功能, 采用文本分析和机器学习方法提取社交媒体中交通事件、交通拥堵、交通事故、道路施工、道路管制、交通天气、交通

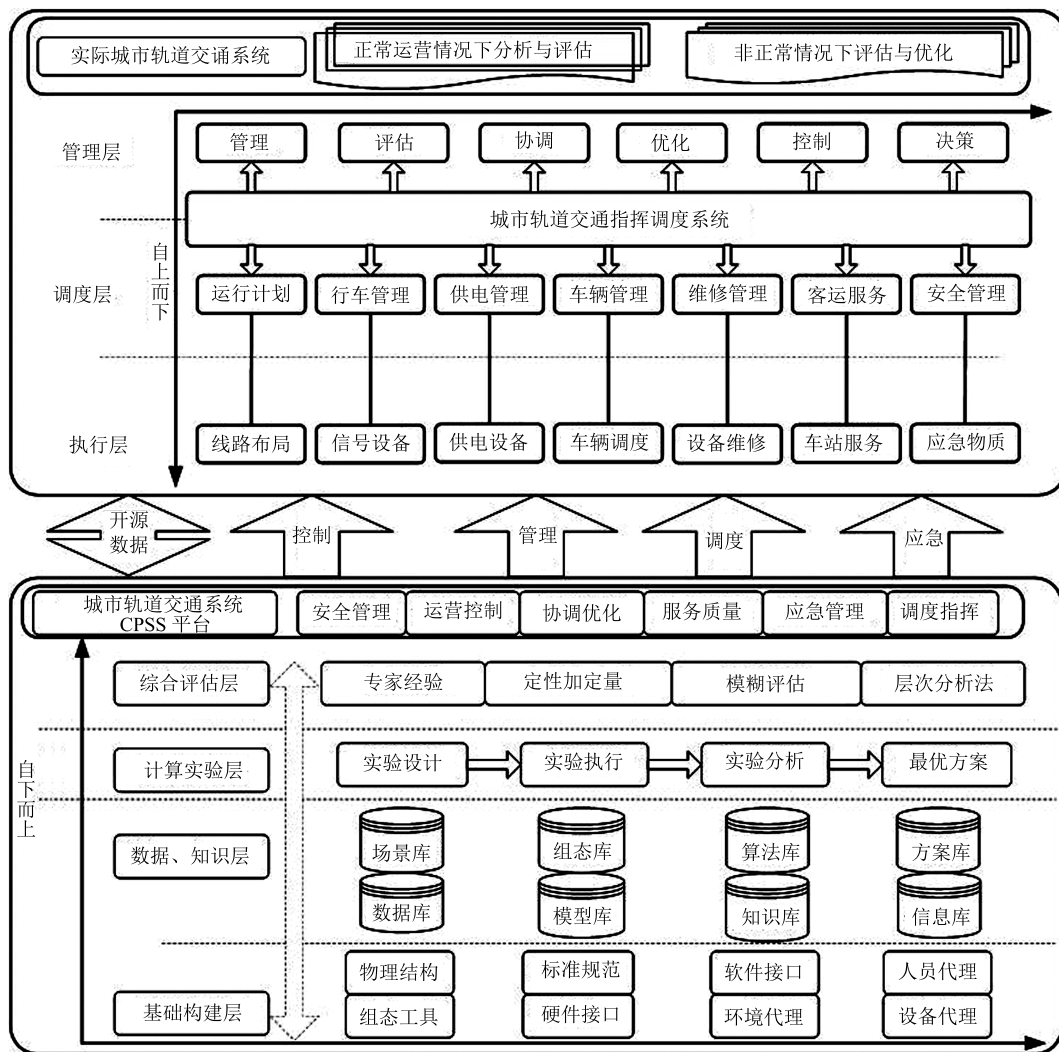


图 3 城市轨道交通系统 CPSS 整体研究路线
Fig. 3 The holistic research route of CPSS-URT

輿情、大型社会活动等交通信息, 并对其分类.

2) 根据从社交媒体中获得的交通信息, 结合实际数据, 采用深度学习方法、概率图模型、统计方法等预测交通流量、行程时间等.

3) 采用网络空间数据与物理空间数据相结合的交通事件检测和交互验证算法, 深入分析面向网络交通状态的城市轨道交通信息时空特性, 对城市轨道交通情景进行分析、诊断、推理.

2.1.2 城市轨道交通物理系统模型

提取城市轨道交通物理系统中乘客、运行系统、客运服务、检修保障、运行环境等信息, 采用包括多 Agent、专家系统、神经网络等多模态建模方法, 构建城市轨道交通物理系统模型 (见图 4).

2.1.3 城市轨道交通 CPSS 通用模型 (Cyber 系统)

城市轨道交通的 CPSS 通用模型 (Cyber 系统) 由系统仿真区和可扩展的模块组成 (见图 5).

1) 环境由社会和交通两部分基础设施组成, 前者包括各种类型的活动场所, 例如学校、医院、公园和商场等, 后者包括车站、机车、信号系统等.

2) 规则库由用算法形式描述和用 If-Then 形式描述的规则组成, 用于表现 Agent 的行为.

3) 分布式组件用于实现分布式计算, 以支持大规模的路网模拟, 需要处理分布式交互、协调、通信等关键问题.

4) 实验评估器用于采集系统模拟区内的过程和

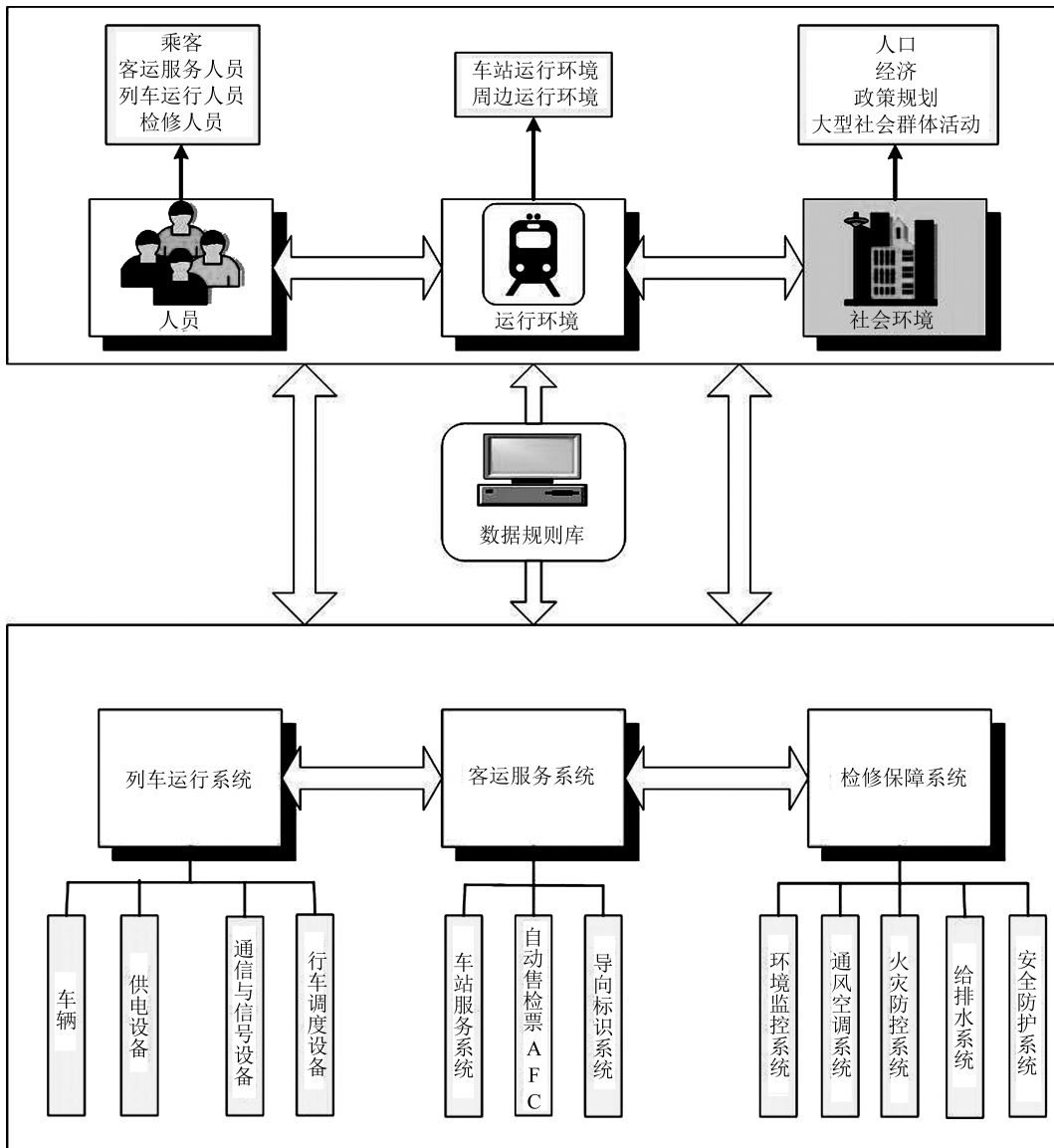


图 4 城市轨道交通 CPSS 物理系统模型架构

Fig. 4 The model architecture of physical system of CPSS-URT

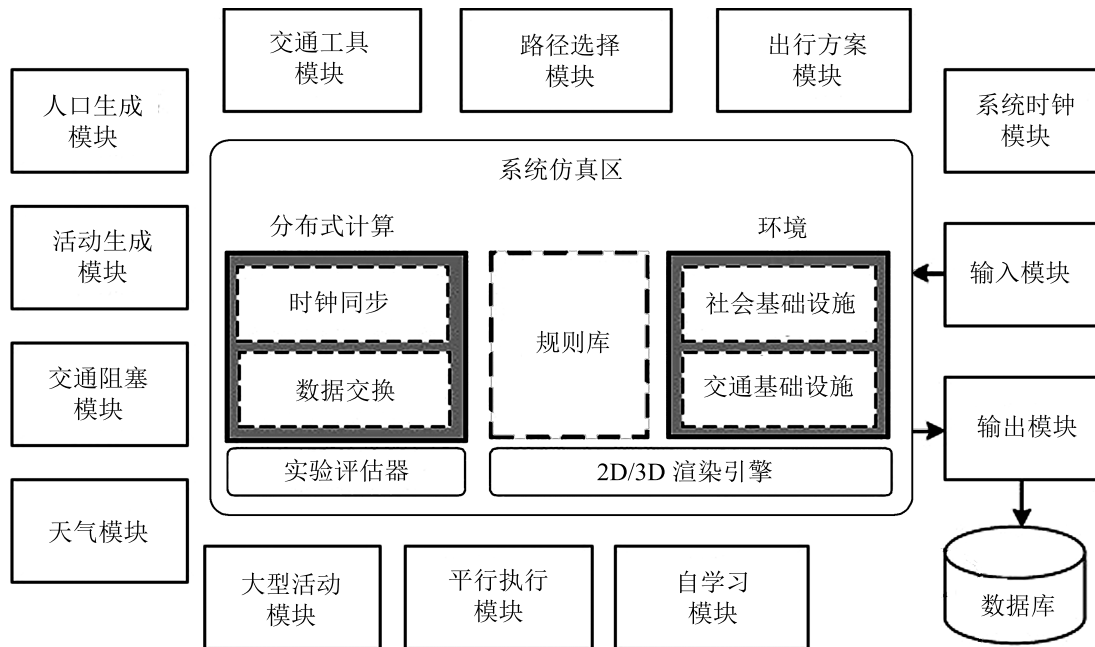


图 5 城市轨道交通 CPSS 通用模型 (Cyber 系统)

Fig. 5 The universal model (Cyber system) of CPSS-URT

结果数据, 以便事后进行计算实验分析。

5) 交通场景渲染引擎, 用于呈现模拟的交通场景。

6) 人口生成模块根据输入的人口配置, 生成满足一定规模和特征的人口 Agent。

7) 活动生成模块对应每个人口 Agent, 根据其自身属性生成日常活动列表。

8) 出行方案模块用于生成一次出行活动的交通方案, 包括出发时刻、OD、路线等。其中, 出行中使用的交通工具由交通工具模块生成, 路线由路径选择模块生成。

9) 交通阻塞模块用于模拟交通事故或施工区, 包括阻塞的车道、范围和时长等因素。

10) 天气模块用于模拟天气情况, 包括风力、降雨量、降雪量、能见度等因素。

11) 大型活动模块用于模拟大型比赛、演出、公益活动等。

12) 平行交互模块, 一方面接入实际交通信息, 通过产生新的 Agent 和系统调度, 使信息在交通模拟过程中发生作用; 另一方面, 返回用户关于交通的查询以及计算实验结果。

13) 自学习模块采用离线或在线的方式, 根据采集到的实际交通信息进行机器学习, 调整 CPSS 平台中的模型和规则。

14) 系统时钟模块是整个系统的核心, 推进整个模拟计算, 触发其他模块执行动作, 决定了 CPSS 平台模拟的时间段和步长。

2.2 城市轨道交通 CPSS 平台及可信度验证

集成城市轨道交通 CPSS 中物理系统、社会系统以及 Cyber 系统建模方法, 采用以多 Agent 为主体的多模态建模方法, 自下而上地对城市轨道交通涉及的各类主要要素进行建模, 研发构建城市轨道交通 CPSS 平台。

基于 Agent 的原则和面向对象的编程方法来实现城市轨道交通 CPSS 平台的建模, 以简单的一致为原则, 将整个轨道交通系统中涉及的包罗万象的软硬对象都作为一个 Agent。每个 Agent 都具有一定的内部状态、行为规则、结构属性, 并可与外部世界进行交流, 随着时间、空间、环境、事件的变化而变化。利用面向对象的编程技术, 可将环境和规则等内部状态以 Agent 的形式封装起来, 赋予封装类以各种变量属性和行为方法, 建立一个 Agent 的世界, 各 Agent 之间通过制定的规则相互作用, 在设定的环境中生长和发育, 根据封装类的多态性引发涌现突变, 以合作、调节、反馈、竞争、冲突的方式实现彼此交互与转换, 演变出结构、性质、状态上同构异态的 CPSS 平台。

城市轨道交通 CPSS 平台构建完成后, 需要进行可信度验证, 包括基本组件的个体一致性验证、子系统的局部一致性验证、整个系统的整体一致性验证等层次, 对各个基本组件和每个单独的子系统的结构合理性及功能进行验证, 最终进行城市轨道交通 CPSS 平台与实际系统整体结构和功能的等价验证。

可信度验证的方法是采用城市轨道交通实际系统的真实数据,对 CPSS 平台不断修正和滚动优化,最终平台与实际系统达到等价.根据数据的来源不同,城市轨道交通 CPSS 平台可信度验证分为两种方式:1)根据实际城市轨道交通系统已有的历史数据,进行离线学习;2)分析研究目标,选取实际正在运行的子系统数据作为 CPSS 平台的输入,在线跟踪学习.通过这两种学习方式协调配合,不断调整和优化 CPSS 平台,确保 CPSS 平台的有效性和合理性,为计算实验和平行执行提供保障.

2.3 城市轨道交通 CPSS 计算实验平台

利用城市轨道交通 CPSS 计算实验平台,可在平台上进行各种试验,对城市轨道交通系统的行为进行预测和分析,单次计算实验流程图如图 6 所示.计算实验系统主要包括:

- 1) 设计同时支持真实和虚拟实验场景的场景生成器.场景生成器能够接受最终用户输入的场景或自动提取场景库中的特定实验场景,实例化实验场景中的交互机制和管理规则,并传递给事件驱动引擎完成计算实验仿真.
- 2) 设计基于离散事件仿真技术实现事件驱动引擎,并动态模拟实验场景中各 Agent 的交互与通信过程.事件驱动引擎采用仿真时钟模拟实验平台运行时的特定时刻和时间变化,按时间顺序存储、分析和确定实验过程中离散事件及事件间的引发关系,通过仿真时钟的推进和离散事件的处理来驱动和模拟计算实验的过程.
- 3) 开发适用于计算实验平台的各类群体策略学习与优化算法、定性定量计算实验评估算法以及对各应用领域提供特定支持的专用算法分析工具,并以模块和组件的形式应用于实验平台中.这些工

具将动态地统计、分析、评估和优化计算实验过程及其结果,并实时更新知识库.

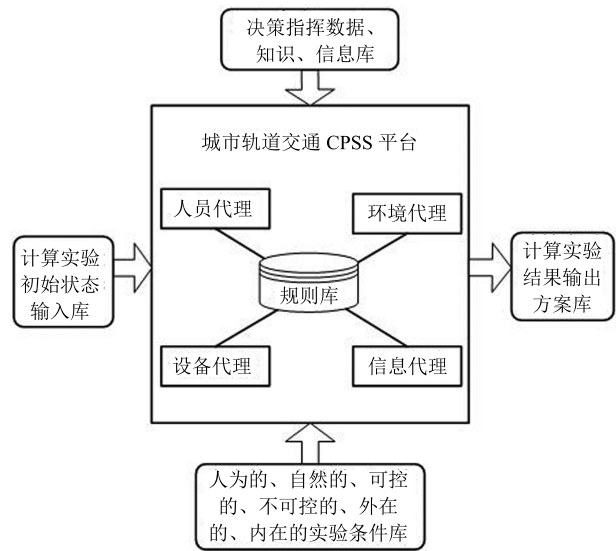


图 6 城市轨道交通 CPSS 平台计算实验流程图

Fig. 6 The flowchart of computational experiments of CPSS-URT

2.4 城市轨道交通 CPSS 综合评估系统

设计多目标多层次的综合评估系统:采用层次分析法确认系统各层次指标的权重,采用专家分析法对不易准确定量的定性指标量化处理,对各指标进行量纲转化,根据模糊综合评价法进行综合绩效评价处理各项指标.

该系统可以对实际城市轨道交通的运用效果和 CPSS 平台的计算实验结果进行分析与评估(见图 7).通过采集 CPSS 平台的实验数据,对预案的效果进行事先及事后的分析与评估;通过采集实际系统的

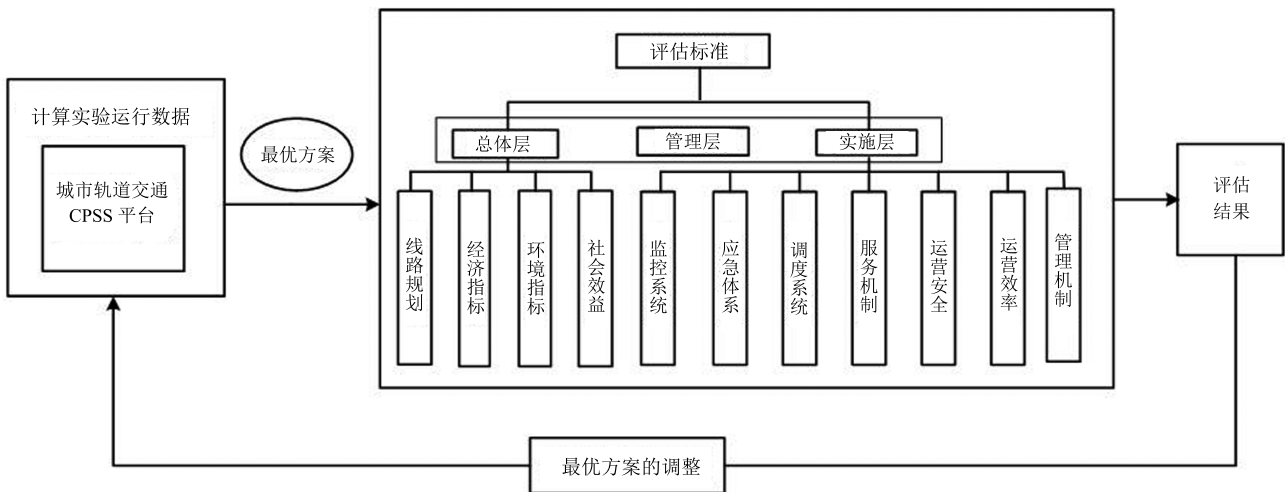


图 7 城市轨道交通 CPSS 综合评估流程图

Fig. 7 The flowchart of comprehensive evaluation of CPSS-URT

数据, 对方案的实际运行效果进行分析与评估; 通过比较实验结果及轨道交通系统实际运行数据, 可以发现方案中的优点或不足, 进行滚动优化.

2.4.1 总体层评估体系

1) 经济性评估分为城市轨道交通建设规划期和投入运营期的经济评估;

2) 社会性评估包括服务系统的高品质性, 对线路沿岸社会生活的影响, 对其他公共交通方式的影响等;

3) 可持续发展性评估主要指低碳、综合节能和减排等方面.

2.4.2 管理层评估体系

城市轨道交通运营最关键的问题就是如何保障运输安全. 从本质上讲, 城市轨道交通运输安全保障系统就是一个以管理为中枢、以人为核心, 以机为基础、以环境为条件组成的, 以保障城市轨道交通运输安全为目的的人-机-环境系统. 在这个系统中, 管理渗透到了每一环节, 对促使各个要素结合起来成为一个整体起着中枢作用. 人既是管理的主体, 又是管理的对象, 人的因素在各国城市轨道交通行车事故中占有很大比重, 因此管理层评估体系是至关重要的.

2.4.3 实施层评估体系

1) 列车子系统的评价体系包含列车自动驾驶、自动防护以及在驾驶员误操作情况下列车自动应急处理、车载通信设备通信、数据传输可靠性、驾驶员技术水平、操作正确性和设备熟练程度等.

2) 轨旁子系统的评价标准体系包括线路建设质量、应答器工作模式、信号机制式的高效性、灾害检

测设备的可靠性等.

3 城市轨道交通 CPSS 平台功能

将 CPSS 平台与实际系统相结合, 既可以对正在运行的轨道交通管理与控制系统进行滚动式改进与优化, 又可以对轨道交通系统的管理者和用户进行虚拟培训, 提高学习效率和操作可靠性, 这样可以节省社会资源、提高服务能力、优化运输系统设计和应用验证流程图如图 8 所示.

3.1 正常运营情况下可靠性分析与评估

通过 CPSS 平台, 可以实验各种各样的城市轨道交通方案, 评估结果不仅包括系统本身的状况, 也包含对周边环境和社会的影响.

对城市轨道交通可靠性的评估如图 9 所示. 评估过程如下:

1) 采用专家经验评估、定性加定量评估, 模糊评估等方法在宏观、中观、微观等层次上对城市轨道交通系统日常运营安全进行可靠性分析、评估、优化;

2) 将分析评估结果输入到 CPSS 平台, 对平台进行优化;

3) 在 CPSS 平台上进行各种不同条件设定下的计算实验, 并对结果进行分析, 择优反馈到实际系统, 形成实际系统和 CPSS 平台的滚动优化.

评估对象可以依照层次分为以下三个方面:

1) 宏观评估. 针对安全可靠、经济效益、社会效应分析, 管理规则评估、列车本身运行安全高效性以及受气候、人口、路况等因素影响的评估.

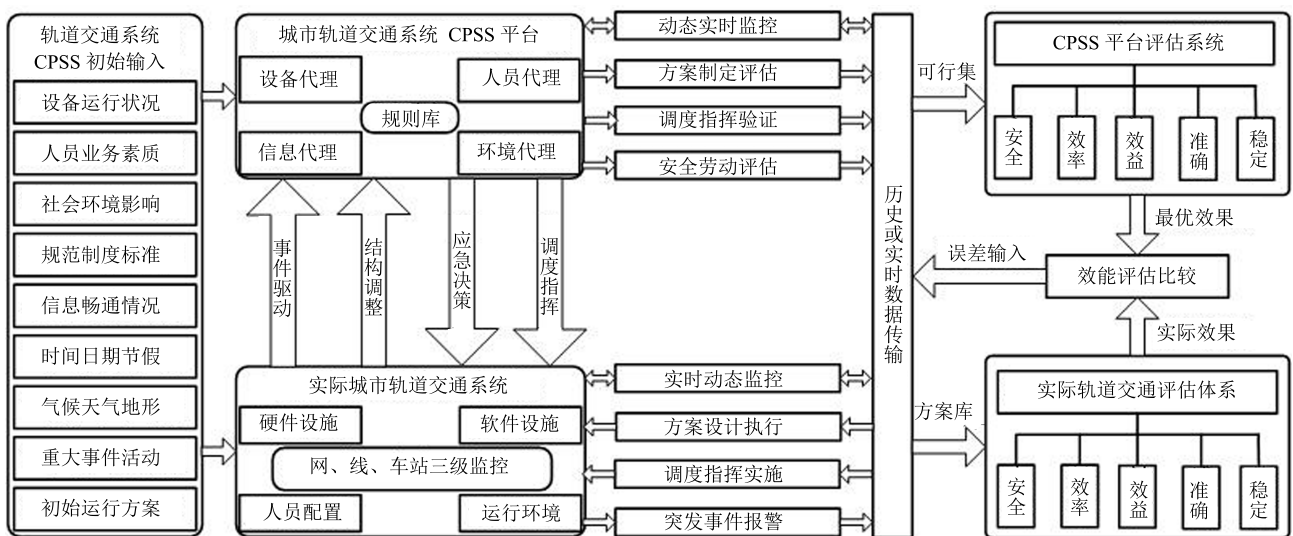


图 8 轨道交通系统 CPSS 平台应用验证流程图

Fig. 8 The flowchart of application of CPSS-URT platform

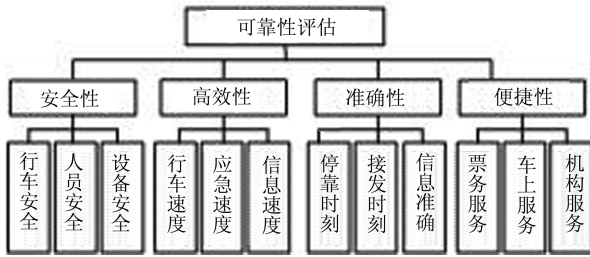


图 9 城市轨道交通系统可靠性评估指标
Fig. 9 The reliability indicators of URT

2) 中观评估. 根据实际要求, 对子系统功能以及要达成的目标进行综合评估. 例如, 在城市轨道交通人员机构子系统的人员配置方案、乘客服务系统中的指引标示分布方案等.

3) 微观评估. 用于城市轨道交通系统 CPSS 构建的基本模块都是越到底层, 越能直观地表现出固有特性. 因此, 微观评估的对象是广泛而具体的.

3.2 非正常情况下的应急预案评估与优化

3.2.1 应急培训与演练

1) 基于实验平台的培育情景, 对不同角色的受训人员, 培训其在正常情况和突发事件情况下的心理素质和反应能力, 熟悉各类突发事件的处理流程及其承担的责任.

2) 通过重复性的情景再现, 提高受训人员的应急处理水平, 使其面对各类突发事件能够有效应对.

3.2.2 应急手段验证

在制定应急预案过程中不能直接验证应急手段的可行性和有效性, 而在 CPSS 平台通过情景设定可验证各类极端情况下应急手段的可行性和有效性, 为应急手段的选取提供参考.

3.2.3 应急方案的评估与优化

1) 通过计算实验, 对应急方案的完整性、可操作性、有效性、经济性等进行评估.

2) 通过评估结果, 对应急方案进行滚动优化.

3.2.4 应急管理和控制

1) 通过实验结果的评估功能, 优化各种非正常情况下的应急方案.

2) 通过透视功能预测突发事件的动态演化过程, 对应急措施进行优化, 通过计算资源减低突发事件处置中生命和财产损失.

3.3 突发事故案例

城市轨道交通系统 CPSS 平台案例分析流程图如图 10 所示. 假如地铁某线路的某辆机车发生事故, 车载传感器等检测装置即时向地铁运营公司发送包括列车类、人员类、环境类等事故信息, 运营公司收到事故信息后, 对事故的发生时间、地点、车次、

客流量等进行全面核实, 立即向上级管理部门、各相关线路、各相关站点等发送紧急事故预警消息, 即时调动维修人员赶赴现场; 与此同时, 系统运营信息及故障信息通过通讯系统传递给城市轨道交通系统 CPSS 平台, 并更新系统中的设备代理、人员代理、环境代理、信息代理等的实际状态, 在城市轨道交通 CPSS 平台计算实验系统中进行针对此种事故的各种情况 (包括历史上类似事故的处理方案、现有预案以及工作人员临时决定处理方案等) 的决策仿真, 并根据城市轨道交通 CPSS 平台综合评估系统的评估结果, 进行滚动优化, 以得出最优处置方案, 并将实验结果返回地铁运营公司, 为公司处理该事故提供决策支持.

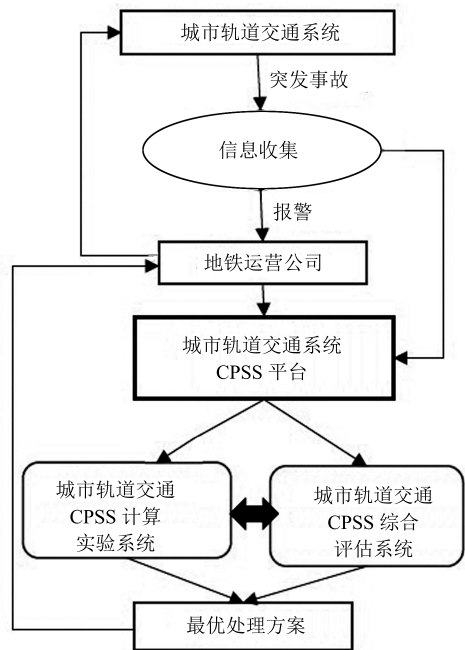


图 10 城市轨道交通系统 CPSS 平台案例分析流程
Fig. 10 The analysis chart of case studies of CPSS-URT

4 结论

复杂系统同时涉及工程复杂性和人为复杂性两个方面, 使得传统的基于机理的建模方法已经不再适用. 同时, 以往对于复杂系统中的人为因素, 尚缺乏有效的建模与分析手段, 主要靠经验和人力执行. CPSS 平台能考虑到实际系统的各方面因素, 将基于机理、统计分析数据和专家经验的建模方法有机地综合在一起, 集成观察数据分析、系统仿真和数学模型等手段, 通过对基本智能体元素简单地一致建模以及元素之间的学习和信息交互, 生成一种由下而上产生整个系统行为的机制.

本文提出了城市轨道交通 CPSS 平台及相应的计算实验平台和综合评估系统的研究内容和构建方

法, 并给出了平台的具体功能. 基于城市轨道交通 CPSS 平台, 可研究乘客、车辆、线路和路网之间的自适应协同互动规律等, 可提高对城市轨道交通这类复杂系统的建模、评估、分析和优化能力. 研究成果可为城市轨道交通设计、疏散预案评价、疏散方案优化、人员培训等方面提供技术支持, 有效提高城市轨道交通运行效率. 本文采用的方法是智能控制理论的基础前沿, 可解决城市轨道交通等复杂系统难以进行传统建模的难题, 也可为其他相似复杂交通系统的建模和优化研究提供新的思路.

References

- 1 Yu Cun-Tao, Li Liang-Yu. *Introduction to Urban Rail Transit*. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2015. (于存涛, 李良玉. 城市轨道交通概论. 北京: 北京交通大学出版社, 2015.)
- 2 Chinese Association of Metros. *The Information of Chinese Association of Metros*, Issue 1, 2018 (Total Issue 17), Jan 1, 2018. URL: <http://www.camet.orgcn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=43&id=3018> (中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通协会信息 2018 年第 1 期 (总第 17 期), 2018 年 1 月 1 日. <http://www.camet.orgcn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=43&id=3018>)
- 3 Lian Yi-Ping. *Safety Management of Urban Rail Transit* (连义平. 城市轨道交通安全管理. 第 2 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2017.)
- 4 Abdullah W M Z W, Jamaluddin H, Harun M H, Rahman R A, Hudha K. Modeling and simulation of railway vehicle using ADAMS/Rail. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **548–549**: 515–519
- 5 Chen Z, Han B M. Simulation study based on Opentrack on carrying capacity in district of Beijing-Shanghai high-speed railway. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **505–506**: 567–570
- 6 Wang Y J, Zhang X. Research on transport capacity of urban rail transit based on RailSys. In: Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT2013) — Volume II. Berlin Heidelberg: Springer, 2014. 235–241
- 7 Van den Hoogen J, Meijer S. Gaming and simulation for railway innovation: a case study of the Dutch railway system. *Simulation and Gaming*, 2015, **46**(5): 489–511
- 8 Möller D P F. *Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation: Computational Foundations and Multimodal Applications*. London: Springer, 2014.
- 9 Pouryousef H, Lautala P, White T. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*, 2015, **23**(1): 30–42
- 10 Han L, Tian C, Wang Y, Wu M L, Luo Z J. Simulation and simulation software development of the braking process of a subway train. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, **556–562**: 294–301
- 11 Mayet C, Delarue P, Bouscayrol A, Chattot E. Hardware-in-the-loop simulation of traction power supply for power flows analysis of multitrain subway lines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, **66**(7): 5564–5571
- 12 Dong X S, Xiong G, Yu Z D, Yu J H, Zhang G X. The construction of parallel systems of subway stations based on ACP approach. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Dongguan, China: IEEE, 2013. 93–98
- 13 Mortada A, Choudhary R, Soga K. Multi-dimensional simulation of underground subway spaces coupled with geoenery systems. *Journal of Building Performance Simulation*, 2018, **11**(5): 517–537
- 14 Dong X S, Liu Y, Xiong G, Zhu F H, Li Z J. Parallel transportation management and control system for subway systems based on ACP approach. In: Proceedings of the 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Qingdao, China: IEEE, 2014. 2906–2911
- 15 Chen X, Li H Y, Miao J R, Jiang S X, Jiang X. A multiagent-based model for pedestrian simulation in subway stations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2017, **71**: 134–148
- 16 Xiong G, Shen D Y, Dong X S, Hu B, Fan D, Zhu F H. Parallel transportation management and control system for subways. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, **18**(7): 1974–1979
- 17 Rajkumar R, Lee I, Sha L, Stankovic J. Cyber-physical systems: the next computing revolution. In: Proceedings of the 47th ACM Design Automation Conference. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2010. 731–736
- 18 Lee J, Bagheri B, Kao H A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, **3**: 18–23
- 19 Zhang Y, Qiu M K, Tsai C W, Hassan M M, Alamri A. Health-CPS: healthcare cyber-physical system assisted by cloud and big data. *IEEE Systems Journal*, 2017, **11**(1): 88–95
- 20 Zanero S. Cyber-physical systems. *Computer*, 2017, **50**(4): 14–16
- 21 Wang F Y. The Emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85–88
- 22 Xiong G, Zhu F H, Liu X W, Dong X S, Huang W L, Chen S H, et al. Cyber-physical-social system in intelligent transportation. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2015, **2**(3): 320–333
- 23 Griffor E R, Greer C, Wollman D A, Burns M J. Framework for Cyber-Physical Systems: Volume 2, Working Group Reports, Special Publication (NIST SP) — 1500-202, National Institute of Standards and Technology, Department of Commerce, USA, 2017.
- 24 Guo W, Zhang L L, Li L. The integration of CPS, CPSS, and ITS: a focus on data. *Tsinghua Science and Technology*, 2015, **20**(4): 327–335

- 25 Zheng X, Cai Z P, Yu J G, Wang C K, Li Y S. Follow but no track: privacy preserved profile publishing in cyber-physical social systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(6): 1868–1878
- 26 Zeng J, Yang L T, Lin M, Shao Z L, Zhu D K. System-level design optimization for security-critical cyber-physical-social systems. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2017, 16(2): Article No. 39
- 27 Rahman S M M. Cyber-physical-social system between a humanoid robot and a virtual human through a shared platform for adaptive agent ecology. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, 5(1): 190–203
- 28 Wang F Y, Zhang J J. Transportation 5.0 in CPSS: towards ACP-based society-centered intelligent transportation. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Yokohama, Japan: IEEE, 2017. 762–767
- 29 Wang F Y. Scanning the issue and beyond: computational transportation and transportation 5.0. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(5): 1861–1868
- 30 Zheng X H, Chen W, Wang P, Shen D Y, Chen S H, Wang X, et al. Big data for social transportation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(3): 620–630
- 31 Pereira F C, Rodrigues F, Polisciuc E, Ben-Akiva M. Why so many people? Explaining nonhabitual transport overcrowding with internet data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(3): 1370–1379
- 32 He K, Xu Z Z, Wang P, Deng L B, Tu L. Congestion avoidance routing based on large-scale social signals. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 17(9): 2613–2626
- 33 Wang Zhi-Hua, Zhang Jun-Wei. Transportation cyber physical system model research. *Highway Engineering*, 2015, 40(5): 146–149
(汪治华, 张俊伟. 交通信息物理系统模型研究. 公路工程, 2015, 40(5): 146–149)
- 34 Wang F Y, Zheng N N, Cao D P, Martinez C M, Li L, Liu T. Parallel driving in CPSS: a unified approach for transport automation and vehicle intelligence. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(4): 577–587



董西松 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副研究员。2007 年获得北京科技大学博士学位。主要研究方向为复杂系统的建模与控制, 智能交通系统。

E-mail: xisong.dong@ia.ac.cn

(**DONG Xi-Song** Associate professor at the State Key Laboratory for

Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from University of Science and Technology Beijing in 2007. His research interest covers the modeling and analysis of complex systems, and intelligent transportation system.)



沈震 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副研究员。2009 年获得清华大学博士学位。主要研究方向为智能制造, 3D 打印, 复杂系统性能评估与优化。

E-mail: zhen.shen@ia.ac.cn

(**SHEN Zhen** Associate professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2009. His research interest covers intelligent manufacturing, 3D printing, and evaluation and optimization of complex systems.)



熊刚 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。1996 年获得上海交通大学博士学位。主要研究方向为复杂系统平行控制, 智能制造, 智能交通。本文通信作者。

E-mail: gang.xiong@ia.ac.cn

(**XIONG Gang** Professor at the State Key Laboratory for Management

and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 1996. His research interest covers parallel control of complex system, intelligent manufacturing, and intelligent transportation. Corresponding author of this paper.)



朱凤华 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。2008 年获得中国科学院自动化研究所博士学位。主要研究方向为人工交通系统, 平行交通管理系统。

E-mail: fenghua.zhu@ia.ac.cn

(**ZHU Feng-Hua** Senior engineer at the State Key Laboratory for Management

and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2008. His research interest covers artificial transportation systems and parallel transportation management systems.)



胡斌 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。2006 年获得清华大学博士学位。主要研究方向为机器人, 辅助驾驶和智能安防。E-mail: binhu@ia.ac.cn

(**HU Bin** Assistant professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2006. His research interest covers intelligent manufacturing, research focuses on the study of key technologies in robotics, driving assistant, and intelligent surveillance.)