

平行交通：虚实互动的智能交通管理与控制

吕宜生^{1,2}, 陈圆圆^{1,2}, 金峻臣^{1,3}, 李镇江^{1,2}, 叶佩军^{1,2}, 朱凤华^{1,2}

(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 100190;

2. 青岛市智能产业技术研究院, 山东 青岛 266109;

3. 银江股份有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 概述了平行交通系统的概念、框架、方法与应用。平行交通系统能够针对具体任务和特定场景构建对应的软件定义的人工交通系统, 在此基础上, 利用计算实验方法进行实验、分析、评估、预测、学习与优化, 并借助平行执行实现对实际交通系统的管理与控制, 实现虚实互动的平行智能。平行交通管理与控制是 ACP 理论的拓展应用, 主要强调虚实互动的平行智能产生方式在城市交通管理与控制中的应用, 以提高城市交通管理与控制的智能化水平。

关键词: 平行智能; ACP 方法; 计算实验; 智能交通系统; 平行系统

中图分类号: 520.20

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201908

Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control

LV Yisheng^{1,2}, CHEN Yuanyuan^{1,2}, JIN Junchen^{1,3}, LI Zhenjiang^{1,2}, YE Peijun^{1,2}, ZHU Fenghua^{1,2}

1. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109, China

3. Enjoyor Co., Ltd., Hangzhou 310030, China

Abstract: The concept, architecture, methods and applications of parallel transportation systems were introduced. The main idea is to build software defined artificial transportation systems for specific traffic application tasks and scenarios; use computational experimental methods for experiments, analysis, evaluation, prediction, learning, and optimization; and parallel execution is conducted for management and control of urban transportation systems, leading to virtual-real interactive parallel intelligence. Parallel traffic management and control is an extension and application of ACP approach, which emphasizes using virtual-real interactive ways to generate parallel intelligence for urban transportation systems, towards improving the intelligence of urban traffic management and control.

Key words: parallel intelligence, ACP approach, computational experiments, intelligent transportation systems, parallel systems

1 引言

目前, 世界范围内的城市交通均存在包括拥堵、安全、污染及能耗等在内的一系列问题。而智能交通系统 (intelligent transportation system, ITS)

则是公认的能够有效缓解上述问题的重要手段。我国在智能交通系统的建设、发展上取得了不错的成绩, 但由于更多地集中在交通信息化上, 导致智能交通系统“不智能、无智能”, 远未达到人们的预期。除行政管理因素外, 究其主要原因, 一是交通

收稿日期: 2019-02-04; 修回日期: 2019-02-20

通信作者: 朱凤华, fenghua.zhu@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2018YFB1004803); 国家自然科学基金资助项目 (No.U1811463, No.61603381)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (No.2018YFB1004803), The National Natural Science Foundation of China (No.U1811463, No.61603381)

系统本身同时具有工程复杂性和社会复杂性，二是没有突破现有的思维框架，没能有效利用先进的理念、计算平台和技术等。

当前，以深度学习为代表的人工智能技术正在不断渗入我们的生产、生活，点燃了人们对未来的期望，对各行各业产生了深远的影响，并在引起巨大变革。这一系列引人瞩目的突破与转变的背后，离不开计算能力的提高、大数据的积累，以及新模型、新算法的出现和老模型、老算法的再集成利用。

近年来的智能交通系统基础设施建设，为感知物理交通世界、获取物理交通数据提供了基础；社交媒体、移动互联网、物联网的普及与发展，为从虚拟空间中感知交通系统、进一步丰富城市交通数据提供了途径。当前人工智能的突破为智能交通系统的发展提供了新视野和可能性。现代城市交通解析、管理与控制已经不再局限于单一领域、浅层数据的统计分析与挖掘，其范畴已延拓到更为深层的基于跨域跨空间（物理空间、网络空间、社会空间）大数据、人工交通系统、人工智能、平行智能相关联的综合分析、评估与决策支持。

继工业技术（industrial technology）“老 IT”时代、信息技术（information technology）“旧 IT”时代之后，智能技术（intelligent technology）“新 IT”时代已经来临。为此，必须转变思维范式，发展智能时代的智能交通系统。本文介绍了虚实互动的平行交通管理与控制，主要包括：在社会物理信息系统（cyber physical social systems, CPSS）下对交通系统进行多模态感知，进而构建各类软件定义的多尺度、多分辨率集成交通系统，在计算机中完成对实际交通系统的解析、建模，利用软件定义的人工交通系统和深度学习、强化学习、自适应动态规划、平行动态规划等人工智能和计算实验方法进行实验、预测、自学习、自优化，并反馈到实际系统和人工系统中，进而完成对交通系统的控制，实现虚实互动的平行智能。

2 平行交通系统的概念框架

2.1 ACP 与平行智能

随着社交媒体、移动互联网、通信技术、传感技术、物联网、云计算、大数据等的发展，现实世界中的实际系统与计算机中的人工系统联系越来越紧密，促使人工系统发生由被动到主动、由静态到动态、由离线到在线、由独立运行到共同运行以

及由短期存在到全寿命周期存在的角色转变。利用数据驱动、机理、经验建模等方法可以对物理世界中的系统进行建模，形成软件定义的系统，即人工系统。实际系统和软件定义的人工系统联接，形成一个闭环的数据、信息、控制交互过程。其中，软件定义的人工系统是基础，通过人工系统可以进行自我运行、超前运行、自我评估、自我博弈等，从而产生海量的数据，用于平行学习，实现平行智能。

平行智能指的是实际系统与人工系统平行运行、虚实交互、学习、执行产生的智能，是基于 ACP 方法的一个新型人工智能理论框架^[1]。所谓 ACP，包括人工系统（artificial systems）、计算实验（computational experiments）、平行执行（parallel execution）三部分，是关于复杂系统建模、计算、实验、决策的一套理论与方法体系^[2-5]。ACP 的基本思想是：构建实际系统对应的人工系统进行仿真建模；开展基于人工系统的计算实验进行实际系统的分析、预测与评估；联接人工系统与实际系统并利用虚实互动与平行执行进行系统的管理与控制等。ACP 方法已经应用于交通^[6-19]、视觉计算^[20]、社会计算^[21-23]、智慧农业^[24]等领域，并取得了良好的效果，其基本框架如图 1 所示。

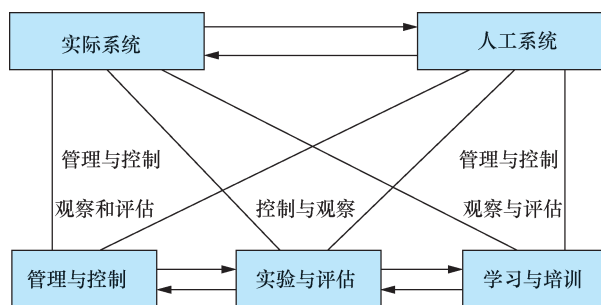


图 1 ACP 基本框架

平行智能的基本流程包含 3 个步骤，即：1) 构建与实际复杂系统对应的软件定义的人工系统；2) 利用计算实验方法进行实际复杂系统的实验、预测与评估；3) 通过互联人工系统与实际复杂系统进行虚实互动与相互借鉴，从而实现复杂系统的平行控制与管理。也就是说，平行智能的核心是构建由实际系统与人工系统组成的平行系统，并通过虚实互动实现对实际系统的引导、控制与管理，驱使实际系统向人工系统逼近。这样，平行智能使得复杂系统研究面临的不定性（uncertainty）、多样性（diversity）、复杂性（complexity）挑战转化成具有深度知识支持的灵捷（agility）、通过实验解析的聚焦

(focus)、能够反馈互动自适应的收敛(convergence), 从而实现对复杂系统的管理与控制。

2.2 平行交通系统基本框架

平行交通系统是指由实际交通系统和人工交通系统共同组成的系统。其中, 人工交通系统是实际交通系统的软件化定义, 不仅是对实际系统的数字化和虚拟化“仿真”, 也是实际交通系统的替代版本, 使计算机成为“活”的交通社会实验室, 是交通仿真系统在更高层次、更广视野上的拓展。平行交通系统将交通仿真从对车辆运动的过程模拟, 扩展为对整个社会背景下人的行为和活动的模拟, 从而使交通的计算机仿真升华为交通的计算实验; 在此基础上, 通过计算实验探究在正常与异常状态下系统各要素的相互作用关系及演化规律, 模拟并“实播”系统的各种状态和发展特性; 最后, 采用虚实互动与平行执行对比并分析人工交通系统与实际交通系统的运转行为差异, 从而实现二者对未来状况的“借鉴”与“预估”, 进而分别调整各自的控制与管理模式。

平行交通系统的框架如图2所示, 包括实际交通系统、人工交通系统, 以及其运行的3种模式——管理与控制、实验与评估、学习与培训。需要特别指出的是, 一个实际交通系统可与多个人工交通系统平行互动, 需针对不同的任务和目的, 创建不同的人工交通系统。

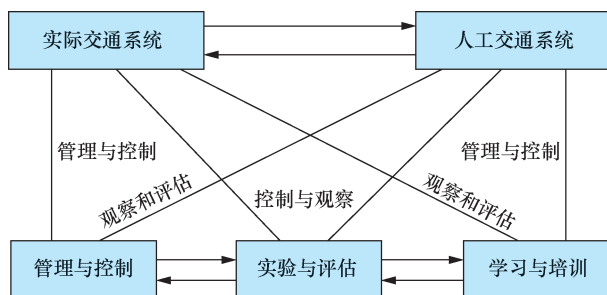


图2 平行交通系统的框架

平行交通系统的运行模式包括以下3种。

- 管理与控制：在这种模式下, 人工交通系统可与实际交通系统进行实时地平行互动与相互借鉴, 平行交通系统通过平行执行实现系统的有效管理与控制。

- 实验与评估：在这种模式下, 主要进行基于人工交通系统的计算实验, 一方面可探究与分析实际交通系统在特定场景下的不同状态与反应, 另一方面可将不同交通方案的试验结果作为效果评估依据并用于管理实际交通系统。

- 学习与培训：在这种模式下, 以人工交通系统为主并将其作为交通管理部门运营的学习与培训中心。此时, 人工交通系统可与实际交通系统在某种意义上有很大的差别, 而且不必平行运作。

平行交通系统框架将人工智能、计算智能、云计算、大数据、物联网、信息物理系统(cyber physical systems, CPS)等概念、方法和技术融于一体, 从而提高现有智能交通技术的性能和可靠度。平行交通系统的控制框图如图3所示。

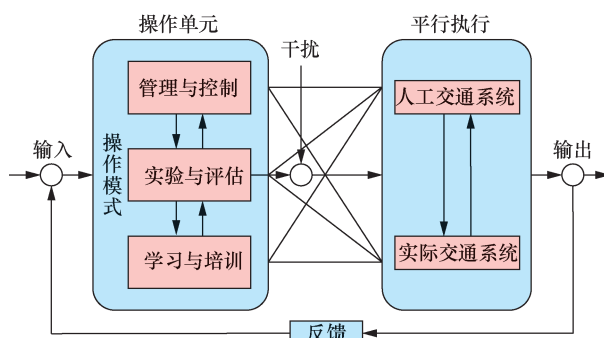


图3 平行交通系统的控制框图

与传统方法不同, 平行交通系统综合运用理论研究、科学实验与计算技术3种科研手段, 兼顾“表象”和“实质”交通信息, 统筹系统的“控制”和“服务”功能, 实现“以人为本”的交通管理。平行交通系统的实现, 将增加对社会性要素的控制与管理, 从而提高对城市综合交通系统动态演化机理的认识能力, 以及对系统处于正常和异常状态下的管控能力。

3 平行交通体系之智能层次

平行交通系统体系中有3个层次智能, 即描述智能、预测智能和引导智能, 下面分别对其进行介绍。

3.1 平行交通之描述智能

平行交通之描述智能指的是构建软件定义的人工交通系统, 并描述实际交通系统。城市交通系统是典型的开放复杂巨系统, 涉及几乎所有的工程学科, 以及经济、人口、生态、资源和法律等社会学科, 介于纯工程系统与纯社会系统之间, 其运行规律极其复杂。针对具体任务和目标, 构建相应的人工交通系统建模和分析体系, 搭建人工交通系统模型生成的支持环境和解析工具。

近年来兴起的软件定义网络(software defined network, SDN)显著提高了网络的灵活性与可拓展性, 成为信息通信领域的热点讨论对象。SDN打破

了常规的网络架构与流程,通过网络控制面和数据面的分离及与开放编程接口的结合实现网络功能的灵活重构。SDN 实现了网络控制的解耦、抽象化封装、逻辑集中控制,体现了硬件的“软化”,这与虚拟的“实化”目标一致。

同样,软件定义的思想可拓展到其他具体领域和问题,形成软件定义的系统^[25]。软件定义的系统使得常识、过程、功能、系统等形式化、软件化,从而可计算、可操作、可实验,有助于复杂系统的设计、运营、预测、管理与控制。将软件定义的思想拓展到交通领域,可构建相应的人工交通系统。

软件定义的人工交通系统,是实现平行智能的基础。接下来,为方便起见,如无特殊说明,本文不对软件定义的人工交通系统、软件定义的交通系统、人工交通系统加以区分。软件定义的交通系统可认为是对传统数学解析建模的扩展,是广义的模型,包括机理、数据、知识模型等。构建软件定义的人工交通系统的方法和技术有很多,例如:人口合成、代理方法、仿真模型、数据驱动方法、语言动力学方法、深度学习和模糊逻辑等计算智能方法,高性能计算,可视化技术等^[26-28]。根据由实际交通系统所得的真实检测数据标定人工交通系统,可增强人工交通系统的可信度,即人工交通系统能满足特定任务需求的系统建模描述能力。利用人工交通系统可进行离线或在线计算实验,从而分析、预测、推演复杂系统的状态和特性,以及评估和优化复杂决策。

针对城市交通系统的工程复杂性和社会复杂性特征,选取典型任务,分别构建数据和机理驱动的多尺度、多分辨率城市交通模型。根据对交通系统细节和尺度描述的不同,交通模型可分为宏观模型、中观模型和微观模型,如流体力学模型、元胞传输模型、车辆跟驰模型、车辆换道模型等。随着交通数据源、量以及形式的丰富,基于数据驱动的交通模型兴起^[29]。生成对抗式思想也被用于交通数据的生成、建模、预测等。

3.2 平行交通之预测智能

平行交通之预测智能是建立在描述智能基础上的对交通系统的评估、预测和优化,实现了对交通状态的估计预测、交通管理与控制方案的测试与评估、交通诱导与控制策略的优化等。预测智能是基于计算实验实现的^[30-31]。

相比于实际实验,计算实验具有成本低、速度

快、实验环境搭建简单的优势,更重要的是计算实验实现了原本无法进行的实际实验,利用计算实验可以反复实验、方便地研究实验系统的参数和行为变化对实验结果的影响,使一些实际中的不可控因素变为可控因素,从而增加人们对实验对象的认识。此外,计算实验还具有自动化、集成化的特点。通过计算实验,可以大批量、大规模地进行实验,并能够自动处理、分析实验结果。

计算实验利用实验设计、数据驱动、知识自动化、机器学习等方法,达到可计算、可学习、可优化、实时性等要求。利用计算实验方法在人工交通系统上进行各种实验或试验,对复杂交通系统的行为进行预测和分析。计算实验设计遵照随机化原则、重复原则、区组原则。依据计算实验的任务和目的,计算实验可以分为比较计算实验、优化计算实验、探索计算实验、验证计算实验、演示计算实验、学习计算实验。其中,自适应动态规划、平行动态规划以及平行学习等都是计算实验中的重要方法。

自适应动态规划(adaptive dynamic programming, ADP)由 Werbos 于 1977 年提出,利用函数近似结构来解决动态规划“维数灾”问题^[32-34]。ADP 与强化学习原理在本质上是一致的,即模拟人类利用环境反馈进行学习优化的过程,近年来其被认为是一种极其接近人脑智能的研究方法。ADP 的典型结构包括评价模块、模型模块和动作模块,其均可由神经网络近似实现,如图 4 所示。另外,ADP 包括 4 种常用结构,分别为启发式动态规划(heuristic dynamic programming, HDP)、二次启发式规划(dual heuristic programming, DHP)、动作依赖启发式动态规划(action dependent heuristic dynamic programming, ADHDP)以及动作依赖二次启发式规划(action dependent dual heuristic programming, ADDHP)。Powell 等在 Schneider 公司的可描述司机和货物动态特性的高精度车队运营仿真器基础上,利用 ADP 方法实现了对 Schneider 公司运营车队的调派管理^[35]。

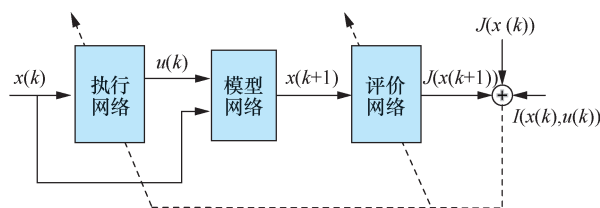


图 4 ADP 的网络结构

强化学习需要进行反复试验 (trial-and-error)。显然,在实际系统中因安全、成本等原因不能或无法进行充分试验。AlphaGo 的成功表明了虚拟环境的重要性^[36]。软件定义的人工系统为应对 trial-and-error 挑战提供了新的解决途径,基于此,文献[37]提出了平行动态规划方法,其结构如图 5 所示。在平行动态规划中,软件定义的人工系统为实际系统提供了解析描述,通过该系统能观测及收集系统状态、动作、回报等信息,可实现对系统状态和控制代理目标函数的建模。在人工系统基础上开展计算实验,利用动态规划方法或 ADP 方法可得到待求问题的决策解。有关平行动态规划的详细描述可参考文献[37]。

文献[38]将 ACP 思想拓展到机器学习领域,建立了平行学习这一新的学习理论框架以更好地解决数据取舍、行动选择等问题。平行学习由数据处理和行动学习两个相互耦合关联的阶段组成(如图 6 所示)。在数据处理阶段,平行学习通过软件定义的人工系统对原始数据中所选取的特定小数据进行演化和迭代,从而生成大量可控且规范的新数据,并将其与原始数据融合为“大数据”集合以用于机器学习模型的学习训练。在行动学习阶段,平行学习依照强化学习的思路采用计算实验方法进行预测学习和集成学习,提取用于某些特定场景或具体任务的“小知识”以用于平行控制和平行决策;如此反复,系统在数

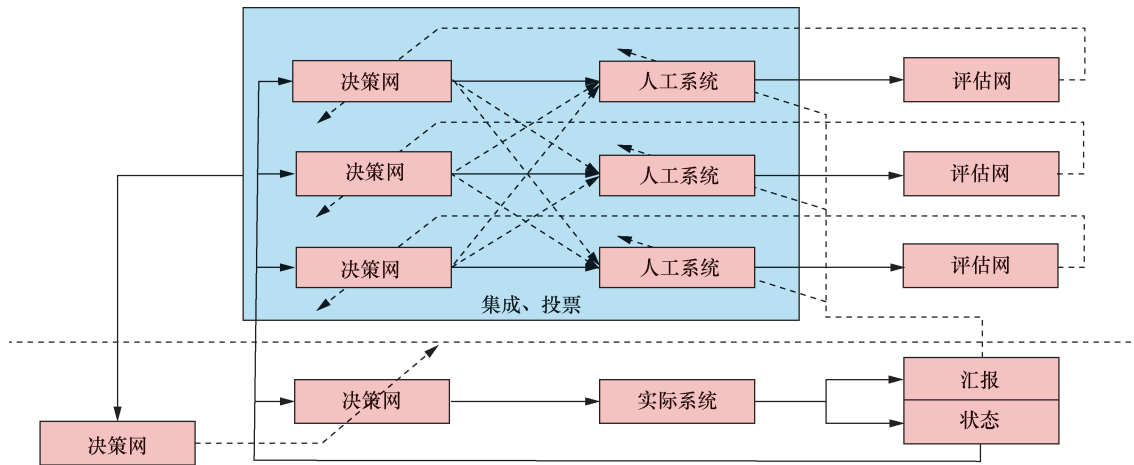
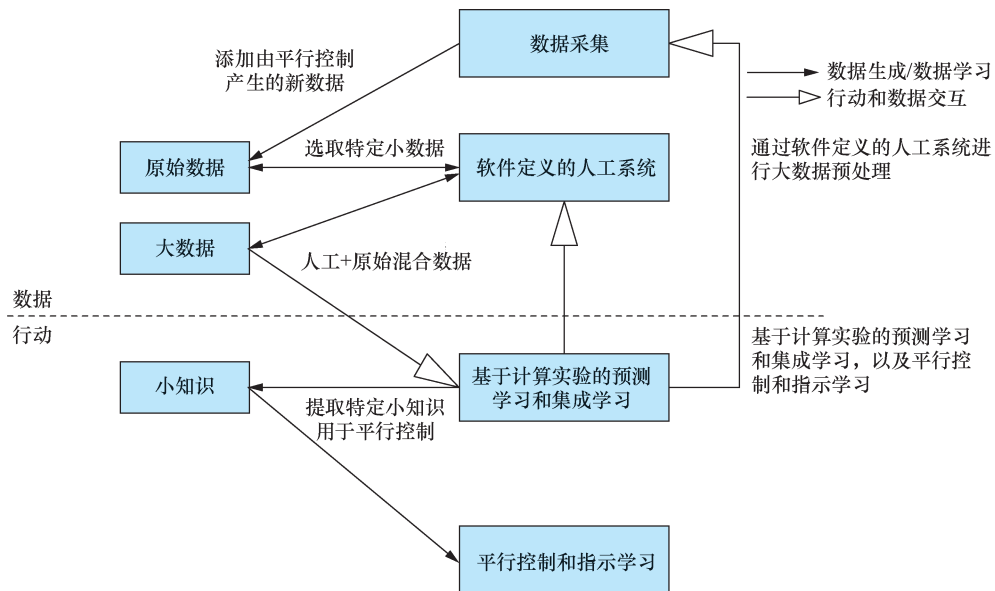
图5 平行动态规划网络结构^[38]

图6 平行学习的理论框架

据和行动之间形成一个不断学习、反馈及更新的闭环结构。

3.3 平行交通之引导智能

平行交通之引导智能通过人工交通系统与实际交通系统间的虚实互动与平行执行实现。通过对比与分析人工交通系统与实际交通系统间的运转行为差异来实现二者对未来状况的“借鉴”与“预估”，进而分别调整各自的控制与管理模式，最终达到实施有效解决方案以及完成学习与培训的目的。在此过程中，常规被动的仿真模拟转变为平行主动的人工系统，并发生由被动到主动、静态到动态、离线到在线的角色转变，最终人工系统由从属地位提升到与实际系统平等的地位，充分发挥其对于优化和完善实际交通系统的管理与控制的影响作用。

人工交通系统与实际交通系统之间的虚实互动、闭环反馈成为管理与控制交通系统的机制，促使整个平行系统向设定或涌现的目标收敛。平行执行把人工交通系统嵌入整个流程环内：根据物理交通世界和网络交通世界感知到的数据、信息，不断地调整、优化人工交通系统，使实际交通场景和系统模型化、数字化、虚拟化，这样人工交通系统可以产生各种各样的场景以及真正意义上的大数据；借助于人工交通系统产生的数据和实际系统中的数据，通过平行学习、平行动态规划、机器学习等方法得到应用于具体场景和任务的“小知识”，并用于测试、评估、预测、控制和决策，从而增强系统的智能化水平。

4 平行交通系统软硬件平台

目前，平行交通系统理论已成为国际交通科学研究领域的新兴焦点，并引起全球范围内众多专家学者的密切关注。笔者所在实验室已研发出平行交通系统的相关软硬件平台，包括交通感知系统、人工交通系统 TransWorld、进行交通实验与分析的 DynaCAS、基于代理的管理与控制平台 aDAPTS、用于学习与培训的平台 OTSt、综合交通管理平台 iTOP 等。

4.1 CPSS 下的交通信息感知系统

实时、全面、准确的交通信息感知是进行交通系统建模、实验、管控的基础。交通数据源和信息源既包括物理空间中的交通检测器，也包括网络空间中的微博、社交网站、网络在线地图等社会交通

传感器。实际物理空间中交通信息的采集主要通过感应线圈、浮动车、摄像头、微波及雷达等完成。进入移动互联网时代后，特别是随着微博、社交网站、在线社区、网络在线地图等的快速发展，网络空间中海量的活跃用户可被看作自愿产生并发布分享交通信息的最灵敏的交通社会传感器，极大地丰富了交通数据的类型和来源，而且其社会效益非常显著，成本低廉。通过感知来源于物理空间、网络空间、社会空间的交通信息，有助于全面和详细了解感知对象^[39]。

笔者所在实验室开发了针对物理空间感知的 RoadScope 检测系统，以及针对网络空间和社会空间的交通信息采集及舆情分析平台，并在实际生产中得到了应用，如图 7 和图 8 所示。RoadScope 采用视频图像分析技术和专用 DSP 芯片，能够实时准确地检测车流量、时间占有率、平均速度、交通密度、车辆类型、排队长度、人群密度、人群数目等交通数据。交通舆情分析平台可以获取交通状态、交通事件、交通舆情等信息。



图 7 RoadScope 检测系统



图 8 青岛交通舆情监测与预警平台

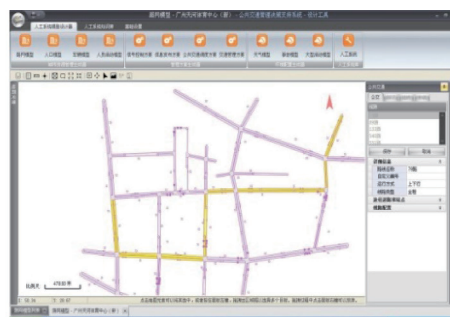
4.2 人工交通系统构建软件 TransWorld

TransWorld 是笔者所在实验室开发的人工交通系统建模软件。TransWorld 采用基于代理的方法对交通系统进行建模。TransWorld 可以对整个城市构建虚拟的模拟环境，包括城市的土地利用、人口及其分布、城市交通网络、人们的出行行为等，能记录每个人任意时刻的位置、所从事的活

动，每辆车任意时刻的位置、速度、尾气排放，以及每个路段、每个交叉口的交通运行状况等。TransWorld 主要由路网构建模块、人工人口生成模块、交通工具生成模块、出行行为产生模块、路径规划模块、交通微观仿真模块、二维和三维动画显示模块、统计分析模块等组成。图 9 给出了 TransWorld 的系统界面^[40]。



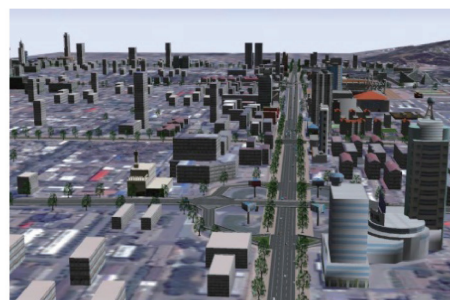
(a) 路网中某交叉口的微观显示



(b) 路网二维显示



(c) 车辆运动的三维显示



(d) 路网和建筑物的三维显示

图 9 人工交通系统构建软件 TransWorld

4.3 DynaCAS

DynaCAS 可用于设计、执行交通计算实验,并评估、分析实验结果。DynaCAS 可实现大规模路网交通状态的估计与预测、交通管理与控制方案的测试与评估以及交通诱导与控制策略的优化与完善等目标任务^[41-42]。同 DynaMIT 和 DynaSMART 相比, DynaCAS 大量采用了大数据、人工智能和复杂系统仿真技术,数据、知识、机理相结合,可方便地用于交通分析与决策评估。DynaCAS 主要由 5 个模块构成:数据分析、实验设计、交通仿真、决策生成、性能评估。DynaCAS 的框架如图 10 所示。

4.4 aDAPTS

传统交通控制系统要么过多地依赖远程控制中心,将很多交通控制方法的分析、处理和优化功能放在控制中心完成,由控制中心实现对路口信号控制器的统一管理和优化;要么弱化远程控制中心的功能,采用完全分布式的控制方法,强化路口信号控制器的自主控制能力。前者采用的集中控制方法虽然加强了系统的控制能力,但需要存储和传输的数据量大、复杂性高,难以实现对路口交通状况变化的迅速反应,影响系统的实时性和适应性;后者虽然提高了单个路口的适应性,但是由于交通系统中路口之间存在密切的关联,单纯对每个路口进行控制优化,难以实现对整个路网或区域的协调控制优化。

本文提出了基于代理的交通信号控制算法,将集中式控制算法分解为面向具体任务的简单分散式控制代理,根据运行条件和需求的不同,通过网络移动到现场控制设备上运行,这样无需增加现有的硬件资源,即能完成与复杂控制算法相同的控制任务。

作者所在团队研发了基于代理的分布式、自适应交通管控平台 aDAPTS (如图 11 和图 12 所示),该平台采用分层递阶的控制模式将系统分为中心组织层、区域协调层和现场执行层,平台引入移动代理技术,移动代理在平台中作为算法的载体^[43-44]。aDAPTS 用于设计、分析、管理、维护智能代理,以完成交通系统的管理与控制。中心组织层具有代理任务分解、控制代理的管理、控制代理的调度、封装控制算法为控制代理等功能。中心组织层包括中心管理计算机、人工交通系统平台、数据库(控制策略数据库、控制场景数据库、控制策略代理数据库),其主要功能包括基于交通策略代理的任务分解功能,交通策略代理的调度功能,交通策略算法到交通策略代理的转化功能以及交通策略代理的管理功能。协调层用于协调控制代理,接收中心组织层发送的控制代理,调整控制代理的参数,转发至现场执行层中的各交通控制设备。执行层为底层的交通控制设备,接收上层发送的控制代理,并完成交通信息采集、交通控制、诱导信息发布等一系列交通管控任务。

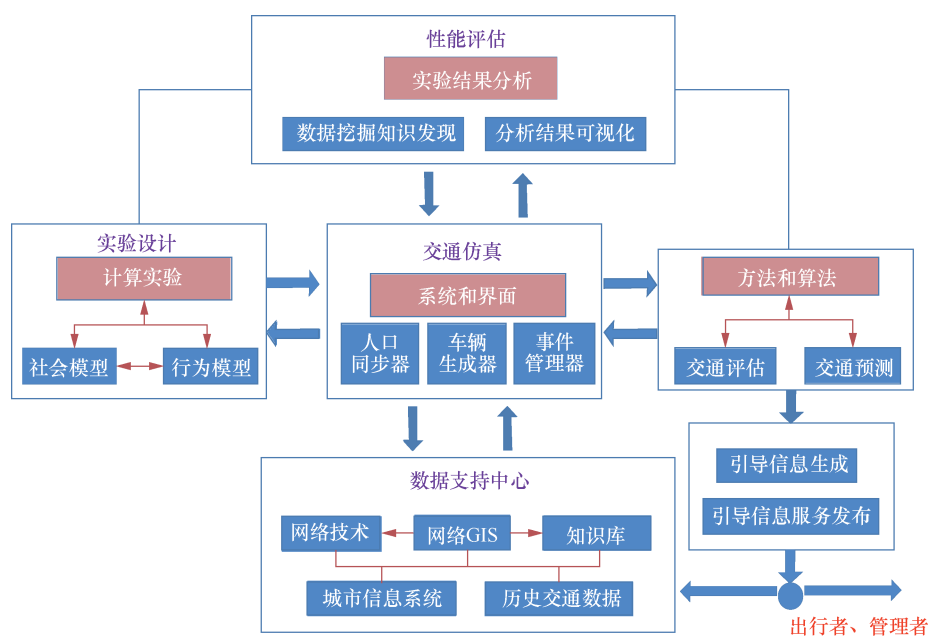


图 10 DynaCAS 框架

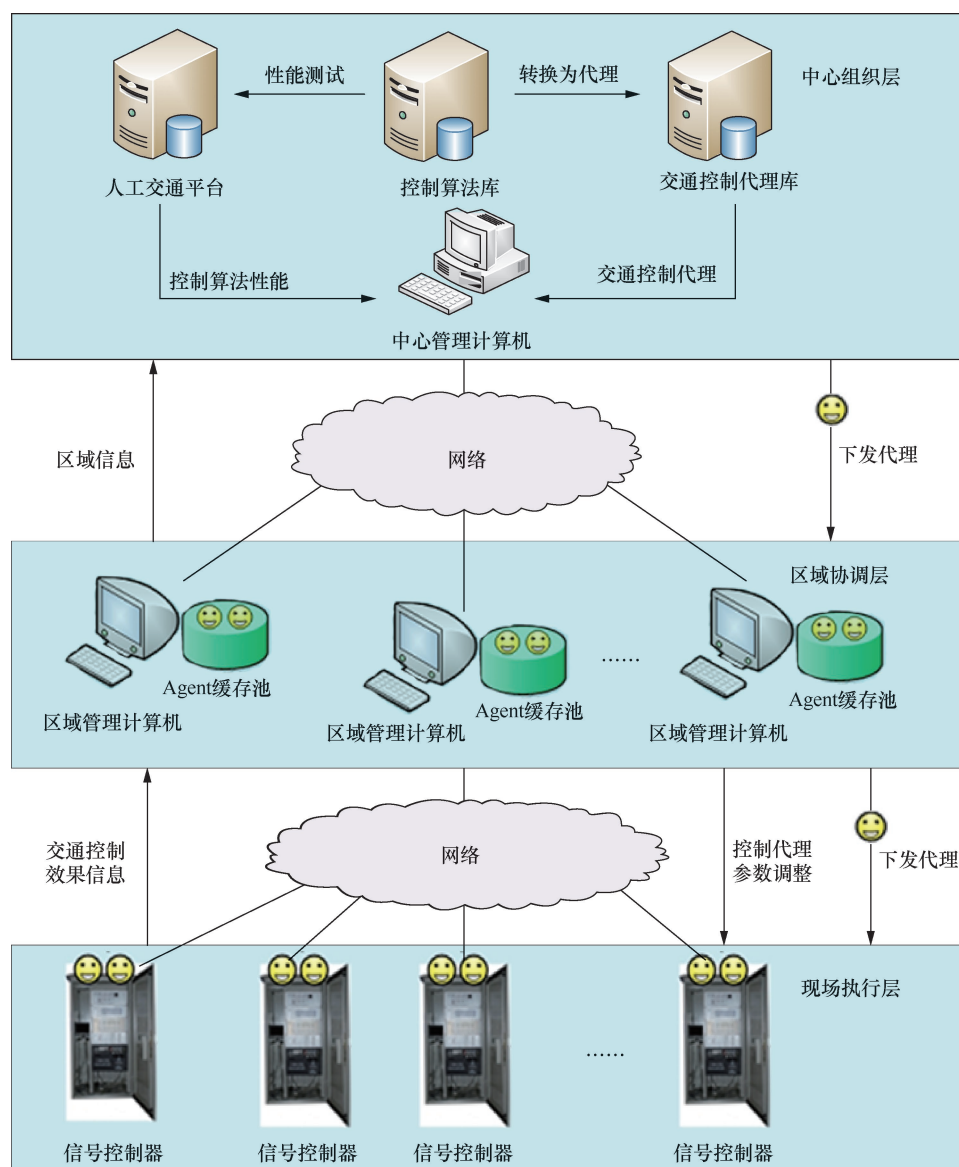


图 11 aDAPTS 系统结构



图 12 aDAPTS 系统界面

基于代理的网络化交通信号控制器由主控模块、输出控制模块、输入模块、视频模块、通信模块、电压电流检测模块和故障检测模块组成，如图 13 所示。其中，主控模块是信号机的核心管理模块，负责管理和协调其他各模块运行，共同实现信号机的各种功能；输出控制模块驱动信号灯、可变标志等外部设备；输入模块负责接收各种外部输入数据和信号；电压电流检测模块和故障检测模块则负责实时检测交通信号控制器的运行状态，进行故障诊断与处理；通信模块负责与控制中心的连接，支持多种传输介质，主要包括光纤、同轴电缆、双绞线、无线等。信号控制器通过移植 jamVM 虚拟机完成代理运行环境加载。交通控制代理在

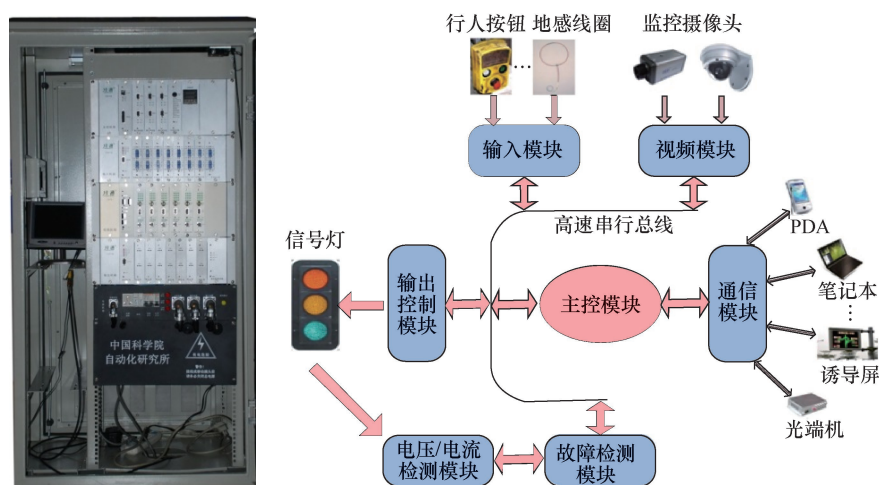


图 13 基于代理的网络化交通信号控制器

JADE LEAP 软件平台上完成了遵循信号机主控板通信协议的交通控制子系统执行层的实现。

4.5 iTOP

综合交通管理平台 iTOP 用以完成交通系统的实际管控。iTOP 通过收集各个子系统的信息，在信息共享的基础上，实现各个子系统功能的集成，包括：人工交通系统（ATS）、OTSt、DynaCAS、aDAPTS 等。iTOP 的主要功能包括：1) 交通数据采集。交通数据来自物理空间、网络空间和社会空间，具体包括线圈、视频、微博、论坛、浮动车、共享单车、地图应用服务、出租车、手机信令等。2) 交通信息处理。根据不同的任务和目标，将采集到的交通数据进行跨空间、跨域、跨模态融合，获取的交通信息包括交通参数（流量、密度、速度、占有率等）、交通事件信息、交通违法信息、交通舆情、天气、活动、交通路况、交通管制、交通路况成因、公共交通运行等信息。3) 交通分析与评估。iTOP 可以分析交通运行状态和交通服务水平，可以用于方案评估、方案改进、交通规划等决策支持。4) 交通信息服务。iTOP 可以将获得的交通信息提供给管理人员，也可以给公众参考，用于公众的出行服务。5) 交通管控运营。iTOP 可以监督、维护、管理与控制交通设备，除了常态下的交通管控服务外，还可提供特殊交通以及应急交通管控服务。

此外，还有服务于交通从业人员学习与培训的 OTSt 平台。OTSt 平台广泛采用虚拟现实技术、代理技术、人机交互技术、人工智能技术等，可使交通从业人员方便、快速地掌握交通法律法规、交通管控设备的使用、正常和异常交通状况的合

理处置等。

5 典型应用

5.1 太仓交通信号平行智能控制

2009 年，应用于江苏太仓太浏公路交通信号控制系统改造项目中的道路交通平行控制系统显著改善了当地的不良交通状况。太浏公路是太仓南部地区重要的东西向骨架道路，研究区域长达 8 km，宽 2.2 km。

利用 TransWorld 建立了太仓太浏公路人工交通系统。借助于太仓太浏公路人工交通系统，对正常、非正常交通压力情形下的交通信号控制方案进行了计算实验评估、优化、再评估、再优化。通过系统实施前后的对比发现：车辆平均速度由系统实施前的 58.5 km/h 提升到 64.3 km/h，如图 14 所示。需要指出的是：改善效果在非高峰时段较为明显，在早晚高峰时段并不明显。

5.2 青岛平行交通管控系统

青岛平行交通管控系统是首个市级道路交通平行控制系统，覆盖青岛市内四区（即市南区、市北区、四方区、李沧区）和崂山区部分区域。根据青岛市城市交通系统与智能交通系统的实际建设情况搭建了青岛平行交通管控系统，实现了青岛人工交通系统与青岛实际交通系统之间的交互运行与过程演化，形成了由交通信息的采集、融合与分析，到交通场景的建模、预测、实验与优化，最终完成交通管控措施的执行、评估与反馈的闭环过程，达到“以人为本”的城市交通智能化决策和科学化管理新水平。

青岛平行交通控制系统平台主要包括青岛人

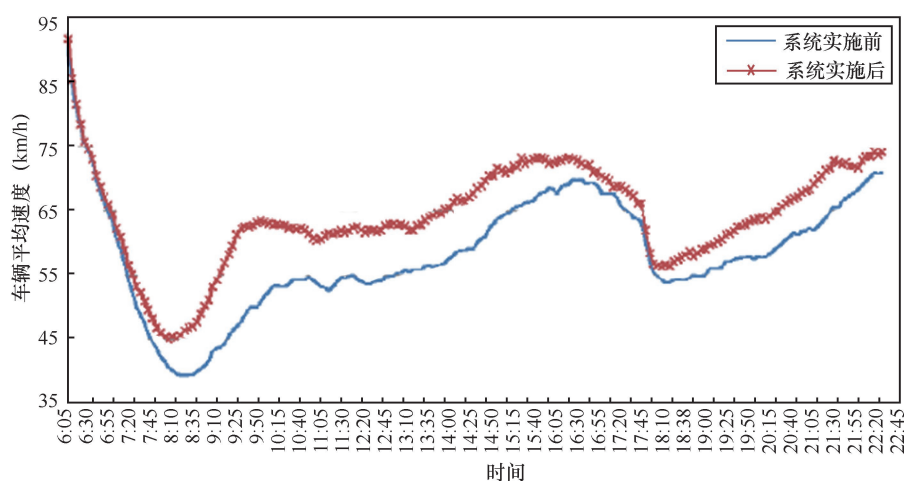


图14 系统实施前后系统内车辆平均速度对比

工交通系统、青岛市交通管控方案计算实验与评估平台、交通人员学习与培训系统、青岛市交通管控方案平行执行系统、青岛平行交通云服务系统等。青岛市平行交通管控系统从青岛市交通路网及用地、设施布局出发,通过实际需求调研与场景分析,构建了青岛市城市级道路交通人工系统,完成了大规模路网的交互式计算,可以像预报天气一样预报交通状况,能对道路交通组织、信号配时方案、大型活动交通预案、应急事件疏散预案等进行评估和优化。

系统应用后,重点道路的拥堵里程、通行时间、停车次数均大幅缩短。此外,项目系统的应用不仅提升了交通出行质量,还减少了道路新建和扩增工程的投资成本,并在环境和能耗方面取得了良好的社会效果。

5.3 广州亚运会平行交通系统

为满足2010年广州亚(残)运会期间公共交通的特殊需求,结合广州市已有IT系统及智能交通发展整体规划,研发了由实际交通系统与对应人工交通系统所组成的广州市亚运会公共交通平行管理系统。其中,亚运人工交通系统将TransWorld作为内核。整个系统包括亚运交通数据检测与分析平台、亚运公共交通保障系统、出租车亚运监控系统、亚运人工交通系统、亚运公共交通保障评估系统、亚运出租车评估系统、亚运交通综合评估系统。

通过构建的亚运人工交通系统,以及人工交通系统与实际交通系统的平行互动,评估并优化亚运比赛公共交通疏散保障方案,实现了对全市600多条线路8000多台公交车以及400多台中小巴士平

均每天130000条发班班次的实时优化与管理。广州市亚运会公共交通平行管理系统首次实现了公共管理方案的科学化制定、智能化系统执行,既有力地确保了亚(残)运会期间交通工作的高效完成,也明显提升了广州市的公共交通运输管理水平^[45-46]。

6 结束语

随着大数据、云计算、物联网、社交媒体、移动互联网、人工智能等的快速发展与广泛普及,城市交通系统的智能化研究面临新的机遇和挑战。深度开发数据、算法、算力已成为提升交通系统智能化水平的必然途径。本文介绍了平行交通系统的基本思想、框架、方法、软硬件平台与典型应用。作为ACP理论的拓展应用,平行交通系统的描述智能、预测智能与引导智能可应用于城市交通管理与控制,其主要内容包括:在CPSS下对交通系统进行多模式感知,进而构建各类软件定义的人工交通系统,在计算机中完成对实际交通系统的解析、建模、表示,利用软件定义的人工交通系统、人工智能和计算实验方法进行实验、分析、预测、学习、优化,最后借助平行执行实现对交通系统的管理与控制,实现虚实互动的平行智能。实际交通系统和软件定义的人工交通系统形成一个闭环的数据、信息、控制交互过程,可有力地提升城市交通管理与控制的智能化水平。

目前,平行交通系统的研究仍处于发展阶段,其性能还须经过更深入的实践检验和证明。平行交通系统的进一步发展和普及,有待完备的理论、算法、系统和软件平台的建立和使用。又由于其涉及多学科交叉融合,因此需要更多的研究和工程人员

投入时间和精力将其由理论推向实践。

(致谢: 感谢王飞跃老师在平行交通系统项目以及本文撰写上的悉心指导。)

参考文献:

- [1] WANG F Y, WANG X, LI L, et al. Steps toward parallel intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(4): 345-348.
- [2] 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[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [3] 王飞跃. 计算实验方法与复杂系统行为分析和决策评估[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 893-897.
WANG F Y. Computational experiments for behavior analysis and decision evaluation of complex systems[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(5): 893-897.
- [4] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [5] 王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法[J]. 中国基础科学, 2004, 5: 5-12.
WANG F Y. Computational theory and method for complex system research[J]. China Basic Science, 2004, 5: 5-12.
- [6] WANG F Y. Agent-based control for networked traffic management systems[J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(5): 92-96.
- [7] WANG F Y. Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems[J]. IEEE Intelligent Systems, 2008, 23(6): 8-13.
- [8] ZHAO Y, GAO H, WANG S, et al. A novel approach for traffic signal control: a recommendation perspective[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(3): 127-135.
- [9] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [10] XIONG G, DONG X, FAN D, et al. Parallel traffic management system and its application to the 2010 Asian games[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 225-235.
- [11] LV Y, DUAN Y, KANG W, et al. Traffic flow prediction with big data: a deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 865-873.
- [12] LV Y, ZHANG X, KANG W, et al. Managing emergency traffic evacuation with a partially random destination allocation strategy: a computational-experiment-based optimization approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2182-2191.
- [13] DUAN Y, LV Y, LIU Y L, et al. An efficient realization of deep learning for traffic data imputation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 168-181.
- [14] HUANG W, WANG K, LV Y, et al. Autonomous vehicles testing methods review[C]// in 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016: 163-168.
- [15] DUAN Y, LV Y, WANG F Y. Travel time prediction with LSTM neural network[C]//in 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016: 1053-1058.
- [16] CHEN Y, LV Y, LI Z, et al. Long short-term memory model for traffic congestion prediction with online open data[C]//in 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016: 132-137.
- [17] YE P, WANG F Y. Hybrid calibration of agent-based travel model using traffic counts and AVI data[C]//IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2017), 2017, Yokohama, Japan, 2017: 16-19.
- [18] YE P, WEN D. Optimal traffic sensor location for origin-destination estimation using compressed sensing framework[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(7): 1857-1866.
- [19] YE P, WEN D. A study of destination selection model based on link flows[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 428-437.
- [20] 王坤峰, 苟超, 王飞跃. 平行视觉: 基于 ACP 的智能视觉计算方法[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1490-1500.
WANG K F, GOU C, WANG F Y. Parallel vision: an ACP-based approach to intelligent vision computing[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(10): 1490-1500.
- [21] 王飞跃, 王晓, 袁勇, 等. 社会计算与计算社会: 智慧社会的基础与必然[J]. 科学通报, 2015, 60(Z1): 460-469.
WANG F Y, WANG X, YUAN Y, et al. Social computing and computing society: the foundation and necessity of a smart society[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(Z1): 460-469.
- [22] WANG X, ZHENG X, ZHANG X, et al. Analysis of cyber interactive behaviors using artificial community and computational experiments[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(6): 995-1006.
- [23] 王飞跃. 社会信号处理与分析的基本框架: 从社会传感网络到计算辩证解析方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 12: 1598-1611.
WANG F Y. The basic framework of social signal processing and analysis: from social sensor networks to computational dialectical analysis methods[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2013, 12: 1598-1611.
- [24] KANG M, WANG F Y. From parallel plants to smart plants: intelligent control and management for plant growth[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(2): 161-166.
- [25] 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 1-8.
WANG F Y. Software-defined system and knowledge automation: parallel sublimation from Newton to Merton[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 1-8.
- [26] YE P, WANG X, CHEN C, et al. Hybrid agent modeling in population simulation: current approaches and future directions[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2016, 19(1): 12.
- [27] YE P, HU X, YUAN Y, et al. Population synthesis based on joint distribution inference without disaggregate samples[J]. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2017, 20 (4): 16.
- [28] YE P, WANG S, WANG F Y. A general cognitive architecture for agent-based modeling in artificial societies[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2018, 5(1): 176-185.
- [29] WANG X, JIANG R, LI L, et al. Capturing car-following behaviors by deep learning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 99: 1-11.
- [30] 吕宜生. 突发公共事件对交通系统的影响分析及对策研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2010.
LV Y S. Analyzing and managing transportation systems under public emergency[D]. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2010.

- [31] 崔凯楠, 郑晓龙, 文丁, 等. 计算实验研究方法及应用[J]. 自动化学报, 2013, 39(8): 1157-1169.
CUI K N, ZHENG X L, WEN D, et al. Computational experimental research method and application[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(8): 1157-1169.
- [32] WANG F Y, ZHANG H, LIU D R. Adaptive dynamic programming: an introduction[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2009, 4(2): 39-47.
- [33] WANG F Y, JIN N, LIU D R, et al. Adaptive dynamic programming for finite-horizon optimal control of discrete-time nonlinear systems with ε -error bound[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(1): 24-36.
- [34] 王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 等. 复杂系统的平行控制理论及应用[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2012, 3: 1-12.
WANG F Y, LIU D R, XIONG G, et al. Parallel control theory and application of complex systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2012, 3: 1-12.
- [35] SIMAO H P, DAY J, GEORGE A P, et al. An approximate dynamic programming algorithm for large-scale fleet management: a case application[J]. Transportation Science, 2009, 43(2): 178-197.
- [36] WANG F Y, ZHANG J, ZHENG X, et al. Where does AlphaGo go: from church-turing thesis to AlphaGo thesis and beyond[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(2): 113-120.
- [37] WANG F Y, ZHANG J, WEI Q, et al. PDP: parallel dynamic programming[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 1-5.
- [38] 李力, 林懿伦, 曹东璞, 等. 平行学习——机器学习的一个新型理论框架[J]. 自动化学报, 2017, 43(1): 1-8.
LI L, LIN Y L, CAO D P, et al. Parallel learning—a new framework for machine learning[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(1): 1-8.
- [39] LV Y, CHEN Y, ZHANG X, et al. Social media based transportation research: the state of the work and the networking[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 19-26.
- [40] MIAO Q, ZHU F, LV Y, et al. A game-engine-based platform for modeling and computing artificial transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(2): 343-353.
- [41] WANG F Y, TANG S. A framework for artificial transportation systems: from computer simulations to computational experiments[C]// in Intelligent Transportation Systems, IEEE, 2005: 1130-1134.
- [42] ZHANG N, WANG F Y, ZHU F, et al. DynaCAS: computational experiments and decision support for ITS[J]. IEEE Intelligent Systems, 2008, 23(6): 19-23.
- [43] LI L, LV Y, WANG F Y. Traffic signal timing via deep reinforcement learning[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(3): 247-254.
- [44] LI Z, CHEN C, WANG K. Cloud computing for agent-based urban transportation systems[J]. Intelligent Systems, IEEE, 2011, 26(1): 73-79.
- [45] ZHU F, CHEN S, MAO Z H, et al. Parallel public transportation system and its application in evaluating evacuation plans for large-scale activities[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(4): 1728-1733.
- [46] ZHU F, LI Z, CHEN S, et al. Parallel transportation management and control system and its applications in building smart cities[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 99: 1-10.

[作者简介]



吕宜生(1983—), 男, 山东蒙阴人, 博士, 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, 主要研究方向为智能交通、人工智能、平行交通管理与控制系统。



陈圆圆(1989—), 男, 河北沧县人, 博士, 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, 主要研究方向为交通数据分析、社会交通、平行交通管理与控制系统。



金峻臣(1991—), 男, 浙江宁波人, 博士, 银江股份智慧交通研究院副院长, 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博士后, 主要研究方向为人工智能、深度学习、平行交通管理与控制系统。



李镇江(1980—), 男, 湖北五峰人, 博士, 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, 主要研究方向为分布式人工智能与多 Agent 系统、平行交通管理与控制系统。



叶佩军(1985—), 男, 四川绵阳人, 博士, 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, 青岛市智能产业技术研究院专业技术工程师, 主要研究方向为多 Agent 系统建模、交通行为分析与交通流优化、人工智能、分布式计算。



朱凤华(1976—), 男, 山东聊城人, 博士, 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, 主要研究方向为人工交通系统、平行交通管理系统。