

平行智能与 CPSS: 三十年发展的回顾与展望

杨静^{1,2} 王晓³ 王雨桐¹ 刘忠民⁴ 李小双¹ 王飞跃^{1,5}

摘要 社会物理信息系统 (Cyber-physical-social systems, CPSS) 在传统物理信息系统 (Cyber-physical systems, CPS) 的基础上纳入对社会信号及社会关系的考虑, 利用网络世界近乎无限的人力、数据和信息资源, 突破物理世界有限的资源约束以及时空的限制. 然而, CPSS 中人类和社会行为的复杂性加剧了实际系统和其模型之间的建模鸿沟, 使得系统的形态演变为“默顿系统”. 对此, 以 ACP 方法为核心的平行智能 (Parallel intelligence, PI) 框架通过组合人工系统 (Artificial systems, A)、计算实验 (Computational experiments, C)、平行执行 (Parallel execution, P) 三个过程, 为跨越这一鸿沟提供了可行的路径. 具体而言, ACP 将模型从系统解析器转变为数据生成器, 使原本难以控制的“默顿系统”可测试、可计算、可验证, 为复杂系统中“涌现”和“收敛”的对立统一确立了方法基础. 本文从平行控制与智能控制、平行机器人与平行制造、平行管理与智能交通、平行医学与智慧健康、平行生态与平行社会、平行经济系统与社会计算、平行军事系统以及平行认知与平行哲学这八个方面阐述面向 CPSS 的平行智能应用成果. 最后, 对 CPSS 未来的发展方向和技术趋势进行了讨论与展望.

关键词 社会物理信息系统, 平行智能, 人工系统, 计算实验, 平行执行

引用格式 杨静, 王晓, 王雨桐, 刘忠民, 李小双, 王飞跃. 平行智能与 CPSS: 三十年发展的回顾与展望. 自动化学报, 2023, 49(3): 614–634

DOI 10.16383/j.aas.c230015

Parallel Intelligence and CPSS in 30 Years: An ACP Approach

YANG Jing^{1,2} WANG Xiao³ WANG Yu-Tong¹ LIU Zhong-Min⁴ LI Xiao-Shuang¹ WANG Fei-Yue^{1,5}

Abstract Based on the traditional cyber-physical systems (CPS), cyber-physical-social systems (CPSS) incorporate the consideration of social signals and social relationships and exploit the nearly unlimited human, data and information resources in cyberspaces to break through the restrictions of limited resources and space-time in physical spaces. However, the complexity of human and social behaviors in CPSS intensifies modeling gaps between actual systems and their models, so that those systems evolve into Merton's systems that are difficult to predict and control. To bridge the modeling gaps, the ACP-based parallel intelligence (PI) framework transforms models from system analyzers into data generators to make Merton's systems computable, testable, and verifiable by combining “Artificial systems (A)”, “Computational experiments (C)” and “Parallel execution (P)”, which provides a methodological foundation for unifying the contradiction between emergence and convergence in complex systems. Moreover, this paper summarizes various applications based on CPSS and PI from eight aspects: Parallel control and intelligent control, parallel robotics and parallel manufacturing, parallel management and intelligent transportation, parallel medicine and smart healthcare, parallel ecology and parallel societies, parallel economic systems and social computing, parallel military systems, as well as parallel cognition and parallel philosophy. Finally, we discuss the technical support and future direction for CPSS.

Key words Cyber-physical-social systems (CPSS), parallel intelligence (PI), artificial systems, computational experiments, parallel execution

Citation Yang Jing, Wang Xiao, Wang Yu-Tong, Liu Zhong-Min, Li Xiao-Shuang, Wang Fei-Yue. Parallel intelligence and CPSS in 30 years: An ACP approach. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(3): 614–634

收稿日期 2023-01-11 录用日期 2023-03-03

Manuscript received January 11, 2023; accepted March 3, 2023
国家重点研发计划 (2018AAA0101502), 国家电网有限公司总部
科技项目: 人在回路的大电网调控混合增强智能基础理论资助

Supported in part by the National Key R&D Program of China (2018AAA0101502) and the Science and Technology Project of SGCC (State Grid Corporation of China): Fundamental Theory of Human-in-the-Loop Hybrid-Augmented Intelligence for Power Grid Dispatch and Control

本文责任编辑 孙长银

Recommended by Associate Editor SUN Chang-Yin

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. 中国科学院大学人工智能学院 北京 100049
3. 安徽大学人工智能学院 合肥 266114 4. 北方自动控制技术研
究所 太原 030006 5. 北京市智能化技术与系统工程技术研
究中心 北京 100190

1. State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 2. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 3. School of Artificial Intelligence, Anhui University, Hefei 266114 4. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan 030006 5. Beijing Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Beijing 100190

随着计算机、通信、控制等各种技术不断发展以及应用成本不断降低, 社会、经济、生态等因素不断加入到原有的工程系统中, 使得系统的复杂程度迅速提高^[1-3]. 为对具有工程复杂性和社会复杂性的系统实现有效管理与控制, 传统的侧重于物理系统 (Physical systems, PS) 或物理信息系统 (Cyber-physical systems, CPS) 的控制方法^[4-6], 难以应对新的系统形态和管控要求, 需要发展新的理论、概念和技术以完成相应的管控任务^[1-2, 7-8].

在此背景下, 信息-社会-物理 (Cyber-social-physical, CSP) 系统于 20 世纪 90 年代末作为一种管控复杂系统的通用框架被提出^[1], 其涉及人类和社会因素, 由物理系统、社会系统以及连接物理系统和社会系统的信息系统所共同构成^[9-11]. 中国科学院智能控制和系统工程中心建立的复杂自适应交通系统实验室 (Complex Adaptive Systems for Transportation Laboratory, CAST Lab) 将 CSP 首次应用于交通领域, 实现交通系统和自动驾驶的平行管控^[12-13]. 社会计算^[14] 和人肉搜索^[15] 是 CSP 的第二个应用领域. 2010 年, CSP 系统被更名为信息-物理-社会系统 (Cyber-physical-social systems, CPSS), 也就是社会物理信息系统^[9]. 2011 年, 国内学者举办学术沙龙, 专门研讨 CPSS 的名称, 有学者提出将 S (Social) 改为 H (Human), 采用 HCPS 或 CPHS 的不同命名方式, 也有学者认为 S 可以涵盖并超出 H 所能表达的全部范围, 因此未形成一致意见. 国外关于 CPSS 的研究起步较晚. 2011 年左右, 此类系统成为欧洲卓越 HYCON2 (Highly-Complex and Networked Control Systems) 网络框架的研究重点^[16], 研究内容从人机共生、人类作为复杂系统的操作员、人类作为多智能体系统的智能体以及人类作为被控系统的一部分这四个方^[17-18] 来讨论人类在复杂系统中发挥的作用. 2013 年, 信息-物理-人类系统 (Cyber-physical-human systems, CPHS) 一词首次在国外出现并被应用在交通领域, CPHS 被定义为包含人类与 CPS 互动的一类系统^[19]. 由此可见, CPSS 和 CPHS 所涉及的内容是完全相同的. 近来, 元宇宙引发了各行各业的广泛关注, 文献^[20-21] 明确指出, 具象的元宇宙是 CPSS 的一种实现, CPSS 是元宇宙的科学抽象.

社会物理信息系统的哲学基础是卡尔·波普尔的“三个世界”理论, 该理论表明宇宙是由三个统一、连贯的世界组成: 物理世界 (第一世界)、心理世界 (第二世界)、人工世界 (第三世界). 第一世界包括客观的物质和现象; 第二世界是主观知识世界, 包含人类的意识状态和主观经验; 第三世界是客观知识世界, 涉及由各种载体记录并储存起来的文化、

文明、科学技术等理论体系的人类精神产物. 三个世界彼此交互、相互作用, 映射成物理空间 (Physicospace) 和赛博空间 (Cyberspace). 图 1 表示了社会物理信息系统的哲学基础和基本结构. 这种结构能够有效整合三维空间的各种资源和价值, 有助于实现复杂系统的“涌现”和“收敛”矛盾的对立与统一.

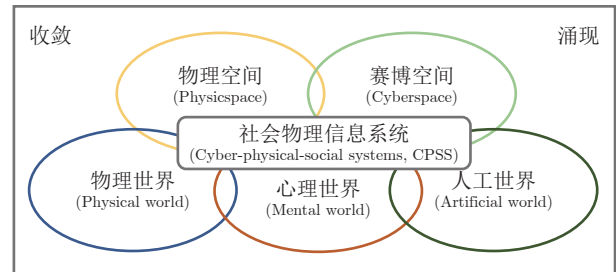


图 1 社会物理信息系统的哲学基础和基本结构^[9]
Fig.1 The basic philosophy and structure of CPSS^[9]

社会物理信息系统扩充了复杂系统的构成要素, 其包含的人类和社会行为的多样性和复杂性, 加剧了物理系统和其模型 (也就是人工系统) 间的认知或建模鸿沟; 以至于使适用于传统物理信息系统的“牛顿定律”, 难以描述和操控 CPSS 中的各种实体^[22-23], 这迫使研究人员将注意力转向“默顿定律”(图 2). 所谓“默顿定律”则泛指以美国社会学家默顿命名的各种能够引导系统行为的“自我实现预言 (Merton's self-fulfilling prophecy laws)”, 其核心思想是“由于信念和行为之间的相互反馈, 预言直接或间接地促成了自己的实现^[24]”. “默顿系统”是一类“人在回路”的系统, 在该系统中, 人类智能和机器智能能够共同思考、并行运行、协同工作来完成同一预设目标. “默顿定律”能够影响或指导“默顿系统”, 其特征就是: 即使给定其当前的状态与控制, 系统下一时刻的状态也无法通过计算而准确获得, 从而系统的行为也就难以被精确地预测. 因此, 本质上无法对“默顿系统”进行直接控制, 只能间接影响.

2004 年, 中国科学院自动化研究所王飞跃研究员提出的平行系统理论, 将模型从系统解析器转变为数据生成器, 使“默顿系统”变得可计算、可测试、可验证, 为弥补建模鸿沟提供了可能 (图 3). 其实, 早在 1994 年, 王飞跃研究员已经提出将模型作为数据产生器和可视化工具的影子系统^[25], 随后, 在“三个世界”思想的影响下, 发展为平行系统、平行智能等概念. 平行系统理论的核心是由人工系统 (Artificial systems, A)、计算实验 (Computational experiments, C)、平行执行 (Parallel execution, P) 组成的 ACP 方法^[7]. 其中, 人工系统是基础, 计算

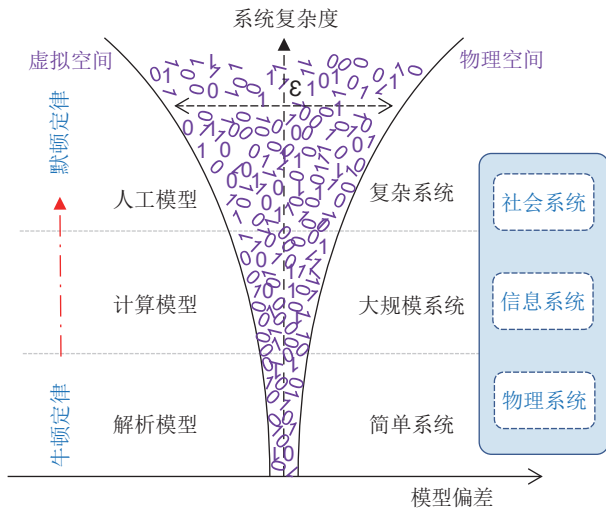


图2 人工系统和物理系统间的建模鸿沟^[26]

Fig.2 The modeling gaps between actual systems and artificial systems^[26]

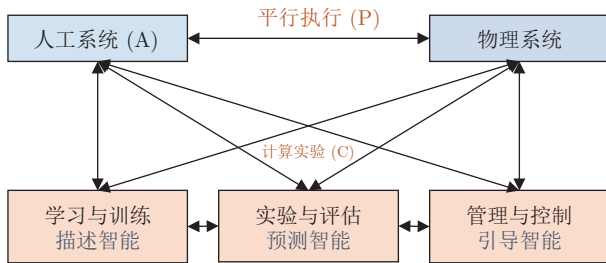


图3 平行智能的系统框架和流程^[27]

Fig.3 The framework and process of parallel intelligence^[27]

实验是核心, 平行执行是目的. ACP 方法将描述智能、预测智能和引导智能汇集为一体, 利用一个或多个虚拟人工空间, 化解复杂化和智能化的本质矛盾, 使“无解”问题变得“有解”, 进而实现“默顿系统”的有效求解. 另外, 人工系统和实际系统的关系可以是一对一、一对多、多对一、多对多, 这取决于问题的复杂度和求解的精确度. 在求解过程中, 人工系统和实际系统之间虚实互动、交互执行, 产生了一种智能形式, 被称为平行智能^[26-27].

1 国内早期进展

从实际情况看, 尽管交通网络是 CPSS 最早被应用的领域, 但信息网络的进步才是推动 CPSS 发展的最大动力. 2000 年左右, 互联网技术迅速发展, 企业、银行等机构的信息安全受到严重威胁. 为维护信息安全, 王飞跃研究员呼吁开展信息-社会-物理 (CSP) 系统的研究, 特别是使用 CSP 实现知识自动化 (CSP for knowledge automation), 用于在

线信息的收集和处理. 同时, 人肉搜索 (Human flesh search, HFS) 现象逐渐在中国出现, 继而蔓延到美国和世界各地, 并于 2006 年底发展出众包的概念^[15, 28-29]. 人肉搜索是以互联网为依托, 集合众多网民的力量, 搜索信息和资源的一种社会化方法. 2001 年微软陈自瑶事件 (图 4) 被认为是第一起“人肉搜索”的案例. 该事件规模庞大并且对隐私造成了直接侵犯, 其涉及道德伦理和人类基本权利的关键问题, 因此人肉搜索引擎第一次获得了广泛的关注. 另外, 该事件也表明了社会群体通过信息化网络可以发挥巨大的力量和作用, 这促使中国科学院智能控制和系统工程中心进一步加强了对 CPSS 的研究. 由于该中心完成了基于 CPSS 的人肉搜索网群运动组织 (Cyber movement organizations, CMOs) 方面的开拓性工作^[30-31], 于 2000 年被批准并成立了开源情报小组 (Open source intelligence group, OSIG). 十年后, 王飞跃等撰写了两本关于人肉搜索的专著^[32-34], 但因为一些非学术原因实际上没有出版. 其中一本总结了近十年来的相关工作^[32-33], 另一本详细讨论了人肉搜索的整个研究历程^[34]. 而且, 其中的部分研究工作已形成论文完成发表^[9, 15, 35].

2004 年, 赵伟教授 (现任中国科学院深圳理工大学副校长) 任职于美国国家科学基金会时, 访问正在中国科学院工作的王飞跃研究员, 双方共同讨论当时刚起步的面向社交媒体和社会计算的“CSP 与知识自动化 (CSP for knowledge automation)”项目的科学意义与研究方法. 2006 年, 赵伟教授提出“面向知识发现的 CPS (CPS for knowledge discovery)”之思想, 并推动美国国家科学基金立项, 成为世界上确立 CPS 名称最早的学者^[36-37]. 至此, CPS 在世界范围内成为了重要的研究方向. 2007 年, 中国科学院成立专家团队制定《中国至 2050 年科技发展路线图》. 王飞跃、李国杰、王天然、潘教峰、曹效业、张凤等合力推动将 CPSS (人-机-物系统) 纳入“国家安全”, “信息技术”和“智能制造”路线图, 并出版相应专著^[38-40], 这些专著中体现了 CPSS 的相关思想.

2010 年, 王飞跃研究员将 CSP 系统改名为 CPSS^[9]. 2011 年, 国家自然科学基金在北京工业大学召开研讨会, 旨在探讨信息与自动化技术方面的最新研究方向. 王飞跃研究员提到了 CPSS 的研究课题, 国家自然科学基金委员会信息科学部主任柴天佑提议使用“Human”替换掉“Social”, 也就是 CPHS 或 HCPS. 但由于部分参会人员认为“Social”涵盖的范围比“Human”更加广泛, 该提议未被采纳. 在 2019 年, “Human-CPS (HCPS)”一词再次在

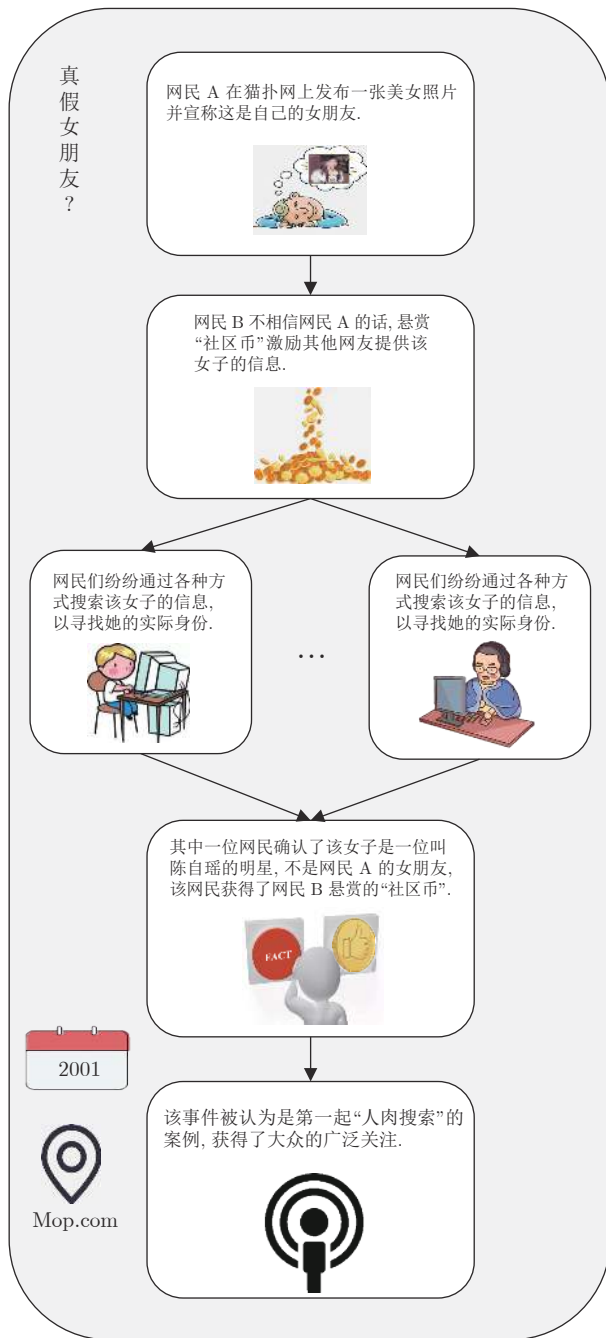


图 4 2001 年微软陈自瑶事件

Fig.4 The Microsoft Ziyao Chen Incident in 2001

中国被推出^[41-42]。总之, 本文认为, CPSS、CPHS 和 HCPS 代表同一个研究方向和研究领域, 只是在名称上有所不同。

纵观整个发展历程, 从最初的 CSP 到后来的 CPSS, 中国在社会物理信息系统方面的研究比国外起步更早, 已经形成了完整的研究体系, 覆盖了城市交通、能源、企业管理、农业等各种领域^[43-47], 并多次成功举办了社会物理信息系统相关的各种学术活动, 承办单位包括国际专业协会的地方分会和

技术委员会, 如国际自动控制联合会 (International Federation of Automatic Control, IFAC)、国际计算机学会 (Association for Computing Machinery, ACM)、IEEE 国际系统、人与控制论学会 (IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, IEEE SMC)、系统工程国际委员会 (International Council on Systems Engineering, INCOSE)、运筹学和管理科学研究协会 (Institute for Operations Research and the Management Sciences, INFORMS) 以及 IEEE 国际智能交通学会 (IEEE Intelligent Transportation Systems Society, IEEE ITSS)。国内研究社会物理信息系统的重点科研院所涉及青岛智能产业技术研究院、中国科学院社会计算与平行管理研究中心、中国科学院复杂系统管理与控制国家重点实验室、中国人民解放军国防科技大学、中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心以及中国科学院哲学研究所这些知名的研究机构。

2 关键元素与基本框架

基于卡尔·波普尔的“三个世界”理论的社会物理信息系统将社会信息、虚拟空间的人工系统信息纳入系统中, 利用虚拟现实等技术, 整合存在于物理世界、心理世界和人工世界的各种物理资源、计算资源和人脑资源, 实现平行化、透明化、智能化、泛在化的管理和服务模式。因此, 社会物理信息系统的关键元素是人、机、物, 三者之间彼此依赖、协调发展。随着大数据、人工智能、云计算等技术的发展, 以计算机为代表的智能机器, 已经不仅仅是人类完成工作使用的工具, 它们已经融入到人类文化、经济和生活中, 延伸了人类的感知和器官^[48-50]。如图 5 所示, 人类被拉进了一个信息生态圈, 该生态圈融合了赛博空间和物理空间, 这对人类的思考和行为产生了巨大的影响, 甚至实现了某种意义上的“控制”。人机物三元信息的融合是提升机器智能水平、实现虚拟空间和现实空间交互融合的关键所在, 这离不开智能技术 (Intelligent technology) 的支持^[51-53]。智能技术是 IT 概念发展阶段的第三阶段, 有助于解决人类社会中的智力不对称问题。在此之前, IT 概念发展先后经历了工业技术 (Industrial technology) 阶段和信息技术 (Information technology) 阶段, 分别为解决人类社会中的资源不对称和信息不对称的问题提供了强有力的工具。

与物理信息系统相比, 社会物理信息系统^[9]进一步加强了信息系统和物理系统的融合, 并将其研究范围扩展到了社会系统。它的核心设备为虚拟的人工系统, 其运行模式将引领虚实互动的平行时代。

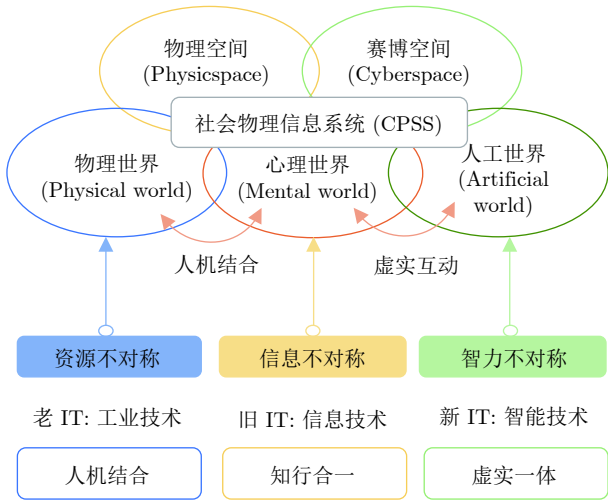


图 5 社会物理信息系统: 平行智能的基础设施^[27]

Fig.5 CPSS: A smart infrastructure for parallel intelligence^[27]

在 CPSS 中, C、P、S 三者无法完全划分清楚, 但大体上可以这样认为, “P”代表现实的物质、自然或物理域, 对应物理世界; “S”代表现实的社会、认知或心理域, 对应心理世界; “C”代表现实的信息、知识或人工域, 对应人工世界^[54]. 社会物理信息系统是协调和整合波普尔的三个世界的基础设施, 并能将人工智能提升到混合智能 (Hybrid intelligence).

随着社会物理信息系统的诞生和发展, 众多研究人员已经探索了其丰富的应用成果, 但它的解决途径与方法只能蕴含在物理空间和虚拟空间融合的求解空间之中^[55]. 而且关键在于引入能提供社会信号的智能实体, 构建专业和社会性的知识网络, 认知和感知社会或企业等组织, 实现复杂系统的智慧运营和管理^[56]. 社会物理信息系统的知识, 蕴含和隐匿在海量物理和社会智能实体之内, 其对知识提取、分析和运用所需要处理的数据和信息容量, 大大超过人脑的带宽. 因此 CPSS 应用的实现必须借助机器智能和知识工程技术, 也就是说, 知识自动化将在其中发挥重要作用^[57].

在大数据时代下, 知识是指导人类和机器学习工作的一系列指令或规则集合. 知识自动化将知识作为被控对象, 实现知识的自动生成、获取、应用和再创造的循环过程. 知识自动化是面向社会物理信息系统的新研究框架, 其最迫切的任务就是将复杂系统的不确定性、多样性、复杂性 (Uncertainty, diversity, complexity, UDC) 特征转变成智能系统的敏捷、聚焦、收敛 (Agility, focus, convergence, AFC) 特性^[54]. 为此, 必须将知识自动化嵌入到基于 ACP 的平行智能框架和流程中, 如图 6, 该框架包括三个典型连接运行模式: 学习与训练、实验与

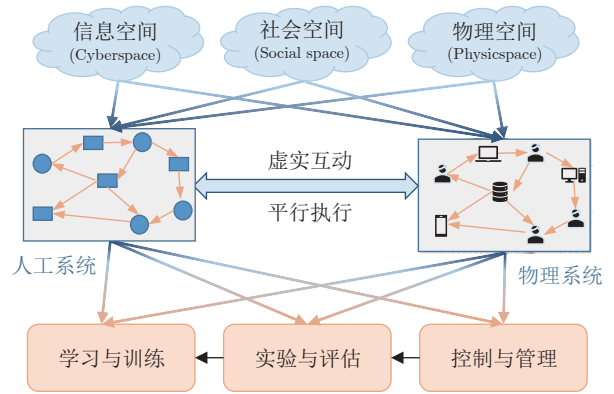


图 6 基于 ACP 面向社会物理信息系统的平行智能框架^[26]

Fig.6 ACP-based parallel intelligence framework for CPSS^[26]

评估、控制与管理.

根据不同意图实际系统和对应的人工系统可以连接成不同模式, 如图 6 所示, 通过比较分析现实和仿真行为, 学习和预测系统的未来行为并修改相应的管控策略. 在学习与训练模式中, 人工系统与实际场景或案例连接或组合, 作为操作人员和管理人员学习和培训的“中心”. 值得注意的是人工系统不必与实际系统完全相同, 它是实际系统沿着不同方向演化的一种可能的替代形式. 在实验和评估模式下, 人工系统作为计算实验的平台, 来分析和预测不同情景下实际系统的行为. 在控制和管理模式下, 人工系统与实际系统实时在线连接, 并且高保真度地复制实际行为, 通过实际系统与人工系统的行为差异识别操作参数并生成反馈控制. 总之, 这种方法使用小数据生产大数据, 再把大数据提炼出深智能, 能够有效突破传统方法的局限, 解决复杂系统中现象之“涌现”与求解之“收敛”的矛盾.

ACP 方法能够把复杂与智能化系统“虚”和“软”的部分建立起来, 充分利用量化、实时化的计算求解复杂系统中的实际问题. 其中, 人工系统是广义的知识模型, 可以看成传统的数学建模或解析建模的扩展; 计算实验是分析、预测、选择复杂决策的途径, 是仿真模拟的升华; 平行执行是由虚实互动构成的新型反馈控制机制, 由此指导行动、锁定目标. 人工系统和实际系统之间闭环反馈、虚实互动、平行执行可以实现复杂系统的有效管控, 由此产生平行智能^[26].

3 操作与流程

平行智能框架是基于 ACP 方法的一种新型人工智能理论框架, 其目标是建立一种获取、创建和支持平行系统智能的机制^[27, 58-62], 主要包含如下三

个步骤: 1) 构建与实际复杂系统对应的人工系统; 2) 利用计算实验训练、预测和评估复杂系统; 3) 通过设置实际物理系统与虚拟人工系统的交互与相互借鉴, 从而实现复杂系统的平行控制与管理. 通过虚拟和真实的交互, 平行智能可以推动实际系统不断逼近人工系统, 简化了复杂系统研究所面临的 UDC 挑战, 实现了对复杂系统的 AFC 管理与控制 (图 7). 接下来本文将详细展开平行智能赋能 CPSS 的整个过程.

3.1 人工系统的构建

人工系统是由软件定义的虚拟系统, 是实际系统在虚拟空间的数字化建模产物. 构建人工系统可以为后续的训练、评估和交互提供一个可靠的实验环境, 从而为复杂系统的管理与控制提供更好的决策支持. 在社会物理信息系统中, 对于包含人类行为和社会组织的这一类复杂系统而言, 人工系统并非只是机械地将真实系统数字化^[63], 而是融合了社会单元、过程和系统等社会层面的知识与关系, 充分建模了人与环境形成的关系总和.

对于物理空间的实际系统而言, 构建人工系统可以克服其不可控、不可重复等缺点^[64]. 通过利用知识表示和知识工程等方法, 可以在虚拟空间中根据不同的优化目标构建不同的虚拟实体, 每一个虚拟实体都对应着实际系统中一种可能的解决方案. 换言之, 人工系统拥有更为广泛的系统多样性, 同时受物理空间中实际实体与关系的约束, 可以根据实际系统衍生为多元的人工系统, 为进一步应用预测智能和引导智能提供实验空间.

3.2 平行智能系统中的计算实验

受限于实际系统中进行主动测试和结果评估的

困难程度, 以及传统物理实验中的主观、不可控、不可观察等过程因素, 在实际系统中进行实验存在许多操作限制, 并且实验本身并不具备可重复性, 以至于难以进一步在系统中应用. 因此, 平行系统选择依据实际系统的真实数据在人工系统中进行计算实验来突破传统物理实验的局限性, 为后续的虚实交互提供重要的理论依据 (图 8).

人工系统拥有多种可能性和广泛的实验边界, 实验人员可以在多元化的人工系统中设计并开展易于操作和可重复的可控实验. 计算实验设计遵循费歇尔 (Fisher) 三原则, 即随机化原则、重复原则和区组原则^[65]. 每一个人工系统都可以根据其预设的优化目标和控制规则进行不同的计算实验, 并且每个人工系统的计算结果均对应着实际系统中一种可能的演化方向. 可以看出, 在有足够算力支持的情况下, 计算实验能够充分利用物理空间中的真实数据, 最大化地发挥人工系统的计算潜力, 从而给实际系统提供充足的选择空间来选出当前条件下的最优结果, 并进一步通过平行执行实现引导智能.

3.3 基于平行执行的闭环优化

为能够更好地将通过计算实验获得的解决方案应用于实际系统, 并根据外部环境变化实时调整相关参数, 平行智能框架以平行执行的方式, 推动虚实系统共同迭代优化, 来引导实际系统的行为和状态. 在根据实际系统的当前条件选出最优解决方案后, 平行执行将该方案应用到实际系统中, 完成系统的决策与控制. 同时, 通过分析实际系统与人工系统的状态和行为差异, 对实际系统的运行模式进行引导, 来使实际系统更趋近于人工系统. 另外, 实际系统的状态和行为变化也可以为人工系统的调整与演进提供反馈信息, 或作为初始条件引导新的人

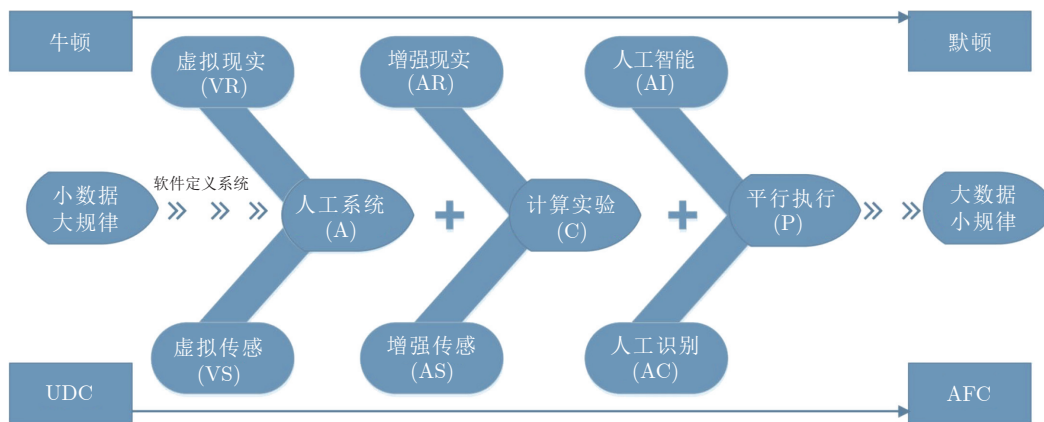
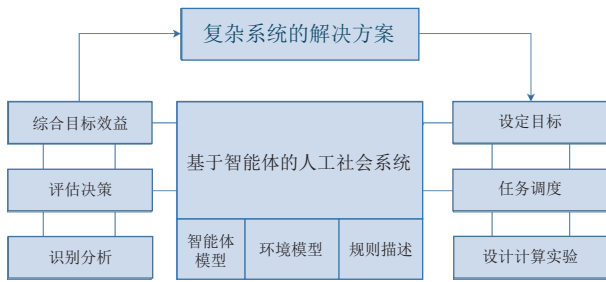


图 7 基于 ACP 的平行智能: 从 UDC 到 AFC^[62]

Fig. 7 ACP-based parallel intelligence: From UDC to AFC^[62]

图 8 基于人工系统的计算实验^[7]Fig.8 Computational experiments based on artificial systems^[7]

工系统的构建,最终形成实际系统与人工系统紧密结合的闭环. 综上,平行执行的核心思想可以概括为虚实互动与闭环反馈,其不仅可以提高实际复杂系统的当前决策水平,同时也为应对未来场景的发展和变化做好了充分的准备.

3.4 相关技术

平行智能框架为社会物理信息系统的管理与控制提供了一套完整的解决方案,涵盖了真实数据的采集、人工数据的生成、人工系统的计算实验以及虚实系统的闭环反馈等各个环节,也为每个环节提供了基于 ACP 方法的技术支撑.

在物理世界中,数据的采集离不开感知技术,这些数据在人工系统的建立环节起着至关重要的作用. 借助平行感知技术^[66],可以利用各种人工场景数据和采集到的实际场景数据优化视觉系统,实现对复杂环境的智能感知与理解. 获得数据后,需要针对具体场景和优化目标进行学习训练. 平行学习^[58]正是平行系统思想扩展到机器学习领域而形成的一种新的机器学习理论框架,该框架全面考虑了实际系统和人工系统不同的数据特点,充分发挥平行系统的潜力. 平行智能的目标是控制、指导和管理复杂系统的决策过程,平行控制^[67]即为一种反馈控制方法,它不但能够完成对物理过程之控制算法的分析,还可以进行对复杂系统之管理规则的评估,从而提高复杂系统的管理与控制水平. 在完成对复杂系统的管控工作之后,最后还需要通过合理高效的方式对系统进行测试与评估,才能正确地把握系统的迭代方向,形成完整的闭环反馈. 平行测试^[43]是一种充分整合人类专家与计算机系统双方优势的“人在回路”智能测试模型,它能够让系统具有在专家知识指导下自我升级的认知机制,产出明确的任务定义与方案,同时也可以借助虚拟场景产生大量的人工测试数据,从而推动系统的测试与评估环节准确高效地运行.

纵观复杂系统管理与控制的全部过程,还需要一些技术来保障系统运行与交互过程中的数据隐私安全,并推动系统间形成共识与激励的良性发展机制. 区块链技术具有去中心化、难以篡改和可编程等优势,其能够保障系统运行过程中的数据安全与公平参与. 平行区块链^[68]在此基础上进一步开辟出人工区块链作为“计算实验室”,通过在人工区块链的广阔空间中进行离线试错实验,实现真实区块链系统以不变应万变的管理与决策.

4 应用

基于 ACP 的平行智能框架,以社会物理信息系统为基础设施,充分发挥 ACP 方法的优势,解决传统方法无法解决的不可精准预测、难以拆分还原和无法重复实验等问题,并将这些优势转化为具体的性能提升. 根据领域的不同,该框架已经在平行控制与智能控制、平行机器人与平行制造、平行管理与智能交通、平行医学与智慧健康、平行生态与平行社会、平行经济系统与社会计算、平行军事系统、平行认知与平行哲学这八个领域得到广泛的应用,取得长足的进步. 图 9 展示了平行智能与社会物理信息系统的主要应用成果.

4.1 平行控制与智能控制

平行感知、平行控制、平行学习和平行测试是基于平行智能框架实现复杂系统感知、建模、决策、控制、测试等任务的技术支撑. 为解决传统感知数据样本复杂性和多样性不足的问题,提升感知系统的泛化能力,平行感知建立传感器、场景等的人工系统,从而同时获取人工场景的数据和实际场景的数据. 平行感知通过计算实验对传感器^[64]、场景模型^[69]参数进行训练和评估,最后通过平行执行来优化感知系统,从而获得更好的感知效果. 针对视觉图像数据,平行图像^[44]、平行视觉^[70]能够生成现实世界中不常见的人工视觉场景,并且实现人工场景数据的自动标注. 目前,开源的平行视觉研究平台 Open-PV (Open Source Parallel Vision Platform) 已被建立^[71-72],并发布了一批虚拟图像集,帮助完成复杂场景的感知与理解.

平行控制^[73]为解决复杂非线性动态系统的控制和优化问题提供了新思路,通过以下三步实现:人工系统重构实际复杂系统;计算实验分析各种控制策略;平行执行将控制策略作用于人工系统和实际系统,再通过人工系统和实际系统间的互动来优化控制策略. 图 10 展示了自学习平行控制基本框架^[74],通过虚实互动,人工系统和实际系统最终能

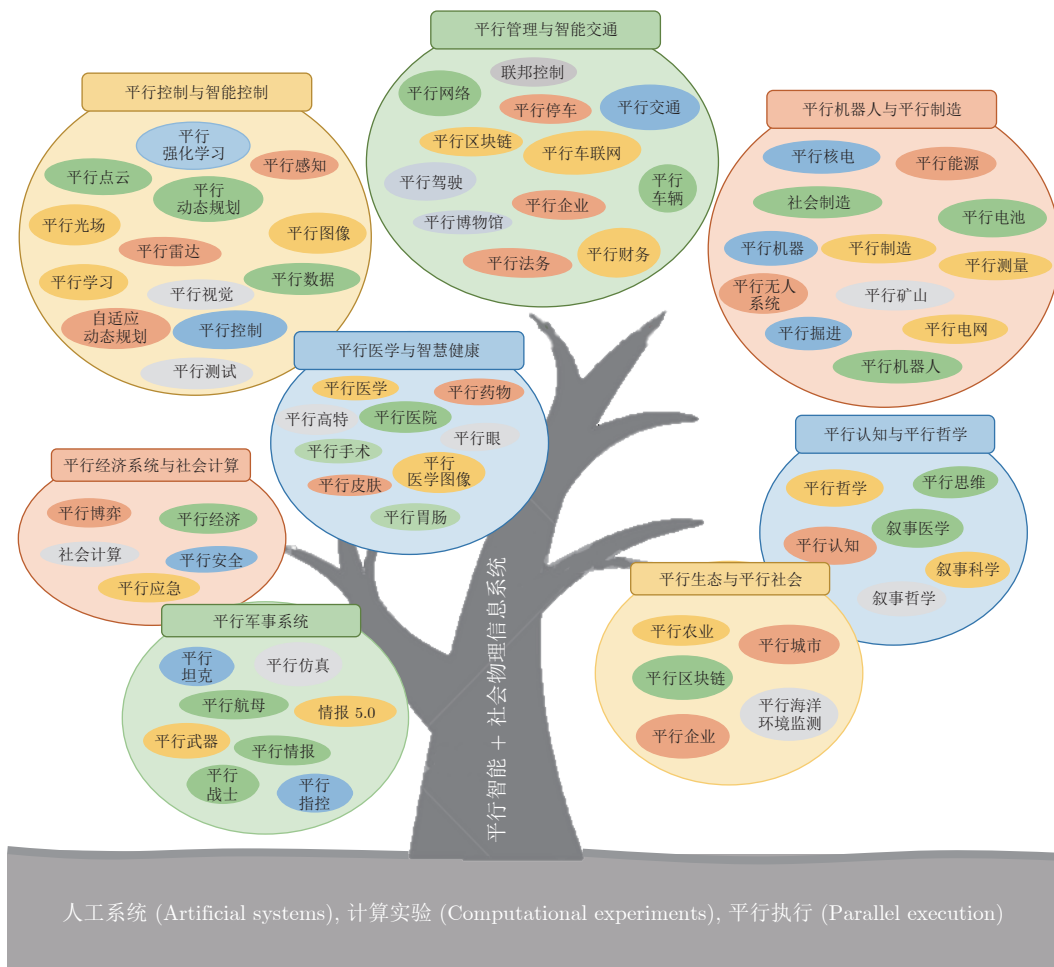


图 9 平行智能和社会物理信息系统的应用成果
 Fig.9 Applications of parallel intelligence and CPSS

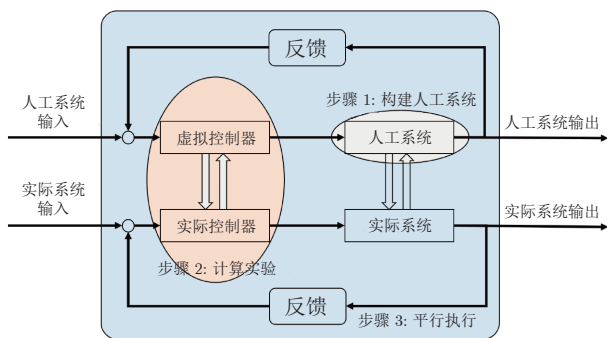


图 10 自学习平行控制框架^[74]
 Fig.10 Self-learning parallel control framework^[74]

够逐步收敛, 实际系统向着预期目标演化. 平行自学习最优控制方法的研究首次分析了平行控制方法的理论性能, 为平行控制的后续研究和广泛应用奠定了坚实的理论基础, 同时也为人工智能可解释性或解析人工智能的发展提供助力.

平行学习^[58-59]是针对现有机器学习方法数据效

率低下、策略选择困难等难题, 构建的新型机器学习框架, 其关键体系结构是数据、知识和行为三者构成的循环. 图 11 展示了平行系统与平行学习的基本框架. 平行学习框架首先利用原始数据构成的“小数据”和软件定义的人工系统生成大量的新数据, 随后将真实的“小数据”和新生成的数据混合组成“大数据”, 为机器学习模型的训练和参数优化提供数据支撑. 在学习阶段, 通过描述、预测、引导等过程, 智能体学习得到能够用于完成复杂系统管控任务的精准知识, 借助所学知识指导行为, 进而产生新的数据, 并以此为基础更新知识, 从而使得整个学习过程能够持续迭代进行. 平行学习通过将数据、知识和行动策略融合进一个完整的闭环优化系统中, 解决实际复杂场景中面临的各种数据和决策等问题, 根据具体目标不断迭代优化, 提升复杂系统的管控水平^[75].

复杂系统运行过程和设计开发的工业产品往往需要大量的验证和测试才能保证其可靠性, 但传统

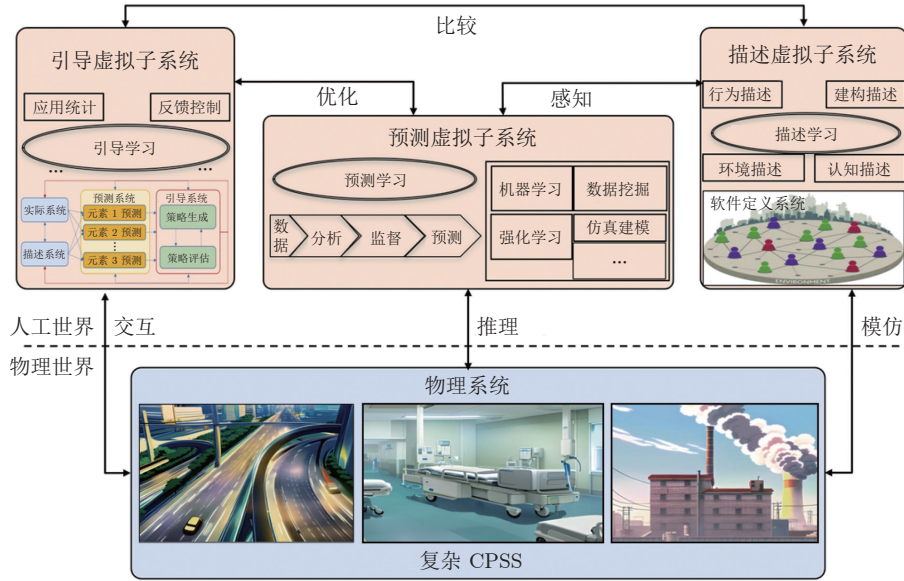


图 11 平行系统与平行学习^[63]

Fig. 11 Parallel learning based on parallel systems^[63]

的测试手段在鲁棒性和效率方面为测试过程带来了巨大的困难,高昂的时间、人力、资金成本阻碍了测试过程的成功推进. 平行测试技术^[43]提出了一种“人在回路”的测试系统,该系统能够结合人类专家与机器学习系统各自的优势,使得系统具备在专家指导下持续升级的能力,从而保持较好的测试能力. 同时,该系统引入对抗学习的机制,摆脱传统测试流程对人类专家先验知识经验的严重依赖,通过机器博弈的过程,自动探索并生成新的测试任务,配置新的任务场景和数据,进而全面高效地对系统和产品进行充分的测试验证. 平行测试系统在中国智能汽车未来挑战赛中持续使用,为该赛事提供了有效的支撑^[76].

4.2 平行机器人与平行制造

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,传统制造模式难以满足高端、个性化、智能化产品的需求. 信息通信技术的发展将越来越多的元素加入到制造系统中^[77-79],使系统的复杂性逐步提高,迫切需要智能的工具和制造模式来快速响应与决策. 平行机器^[80]和并行制造^[81-82]作为这样的工具和制造模式,为制造业的发展和转型指明了一个可行的方向. 并行制造(图 12)基于知识自动化技术获取和分析存在于社会系统中的制造情报,通过集合群体智慧^[83]创造产品,以便能够快速响应市场变化. 同时,企业借助虚实系统协同演化,优化工艺规划、资源调度等完成工业生产^[84-85]. 平行机器^[80]将软件定义的虚拟机器,也就是知识机器,作为实际物理

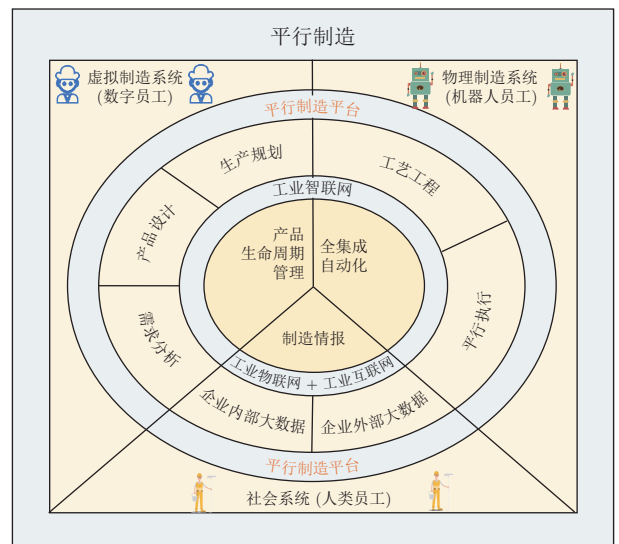


图 12 平行制造框架图^[81]

Fig. 12 The framework of parallel manufacturing^[81]

机器的虚拟代理,基于 ACP 方法实现物理机器的管理与控制. 图 13 表示平行机器系统架构,平行机器比普通机器的系统架构增加了虚拟控制、虚拟执行和虚拟循环的扩展循环,人工系统、计算实验和并行执行充当骨架结构,知识和数据作为血液在其中循环,使得机器能够根据 CPSS 上的系统反馈和管理员指令快速响应. 平行机器人^[86]和并行无人系统^[87]是平行机器的重要组成部分,它们能将人类从繁琐枯燥的体力劳动中解放出来,甚至承担一些人类难以完成的或者可能使之陷入危险的工作.

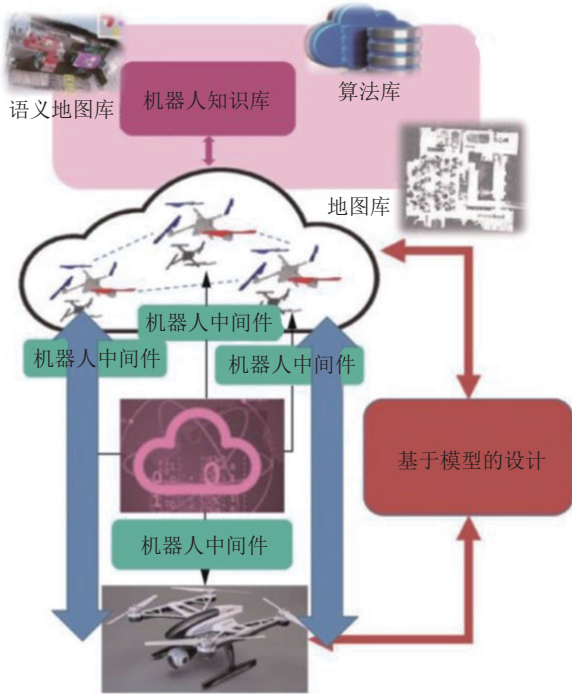


图 13 平行机器的系统架构^[80]

Fig. 13 The system architecture of parallel machines^[80]

能源是制造业的动力之魂, 随着能源革命的兴起, 大量清洁能源逐渐加入到能源系统中, 能源系统复杂程度不断提高^[88-89]. 为保证复杂环境的供电稳定, 解决研究代价高昂、研究场景危险或难以复制等问题, 平行能源^[45]以虚拟人工能源系统为核心, 与实际系统平行执行、交互演化, 促进多能源智能化协同发展. 同样, 清洁能源的大规模使用和信息化水平的提高使电网愈加复杂, 呈现出高度交互化、

高度动态演化和高度开放化等特征^[90]. 平行电网^[91-92]将实际电网空间和虚拟电网空间结合, 以 CPSS 和 ACP 方法为基础, 使实际电网系统逼近虚拟电网系统, 形成一个时空一致、虚实互动和动态演化的电网系统. 针对核能、太阳能和风能等具体清洁能源, 平行核电^[93]和 平行电池^[94]等被提出在降低环境污染的基础上保证供电稳定且维护电网的健康与安全. 针对目前仍然举足轻重的煤炭资源, 平行矿山^[95](图 14)构建平行虚拟矿山与现实矿山协同工作, 指导智能化车辆通过单车作业系统、多车协同系统和车路协同系统在现实场景下完成各类面向场景的任务, 减少人工干预从而降低安全风险, 提高生产作业效率. 针对煤炭井下开采的首要工序——掘挖出地下运输和通风巷道, 平行掘进^[96]在复杂的掘进工作面生产系统中生成大量场景, 并在试错实验中分析系统全局最优控制方案, 实现更有效、更全面的煤矿井下的安全掘进工作.

4.3 平行管理与智能交通

当前, 由于高离职率、参与者的自由意愿以及行为的多样性, 组织或系统比以往任何时候都更加复杂. 平行管理基于 ACP 和 CPSS 利用虚实互动、平行执行等方式有效改善各种复杂组织或系统的管理, 如城市交通、企业等.

交通系统包含了驾驶员、行人等的动态变化和社会关系, 同时具有一定的物理和社会过程, 是一个典型的社会物理信息系统^[97-98]. 数据不足、实验代价大以及封闭环境等问题使交通系统难以应对复杂多变的交通环境^[99-101]. 基于 CPSS 的平行交



图 14 平行矿山示意图^[95]

Fig. 14 The concept of parallel mining^[95]

通^[13, 46, 102-103]系统(图 15)通过将交通信息的收集、分析、建模、预测、控制管理和测量反馈等环节整合到一个完整的闭环系统,有效应对了复杂多变的交通环境.该系统利用泛在终端产生的大量交通数据和虚拟数据构建人工交通系统,在此基础上,基于计算实验分析各种交通行为背后的规律以及原因,选择最优管控方案将其应用于实际系统.在平行交通思想的指导下,中国科学院自动化研究所于 2010 年自主研发出平行交通管理系统 PtMS^[13],在江苏太仓、广州亚运会和山东青岛等地取得了较好的应用效果^[104].

自动驾驶技术是世界汽车产业的最新发展方向,但仍面临着感知不足、决策灵活性差以及知识和经验融合难的挑战^[105-109].平行驾驶^[61]通过人工世界的模拟和交互来完成复杂的自动驾驶任务,并通过在人工世界中积累的知识经验,指导现实世界中真实车辆的运行和驾驶过程.平行驾驶系统包括描述车、预测车、引导车和真实车^[63],其中,描述车学习现实世界中的对象,通过描述学习的手段,建模车辆、驾驶员和外部环境等,从而将车辆的动态特性、驾驶员的驾驶策略和外环境的交通状态等转变成成为软件定义的对象.预测车运用预测学习思想,学习利用已有的信息和数据,预测产生不存在的信息,加强模型理解世界的的能力.预测车通过观察和演示,仿真预测可能的未来,通过计算实验,实现自动驾驶车辆在安全、效率等方面的目标.引导车旨在生成一系列合适的行动策略,其通过关注平行驾驶系统中学习到的策略能否在现实世界中被利用,引导真实车辆获得有助于取得最优性能的策略.通过上述三个虚拟车和真实车的不断交互,实现在人

工世界和真实世界的虚实合一.

企业是国民经济的微单元,是社会经济进步的主导力量.但传统企业在实际运行过程中,一方面对环境大数据缺少全面准确的获取手段和分析能力,另一方面也无法及时整合调整已有的数据、资源和工作流程,从而导致人和社会因素对企业的影响被忽略.企业人员与关系网络的复杂性、管理过程的主观性、外部环境的动态属性等都使得企业愈加需要新的管理形式.基于 ACP 方法的平行企业(图 16)^[110],借助多 Agent 等技术,对企业的采购、库存、生产、销售、售后、财务等流程进行建模,同时利用数据采集和实验决策等技术,实现企业运行全流程的模拟.通过计算实验,定量分析不同岗位、功能的变化对企业运行成本、效益的影响.借助平行执行,快速更新迭代管理策略,最终实现平行企业的虚实互动合一,推动企业运行质量的不断提升.图 16 展示了平行企业的基本运行流程.

4.4 平行医学与智慧健康

针对传统医疗方法过分依赖医生经验、医患关系紧张以及 AI 辅助诊疗医学样本量不足、可解释性差、难以精准认知疾病等问题^[111-112],平行医学^[113]利用 CPSS 和平行智能方法研究与医学相关问题的体系,致力于从医学小数据产生医学大数据并提炼出医学知识,使医学向科学性、人文性、社会性的智慧医疗迈进.针对医疗研究的重要数据——医学图像,平行医学图像^[114]整合平行学习、平行数据和专业知识,为实现小样本医学影像分析的可解释性提供了一个可行的框架.

医院是医学研究并造福人类的主要实施机构,

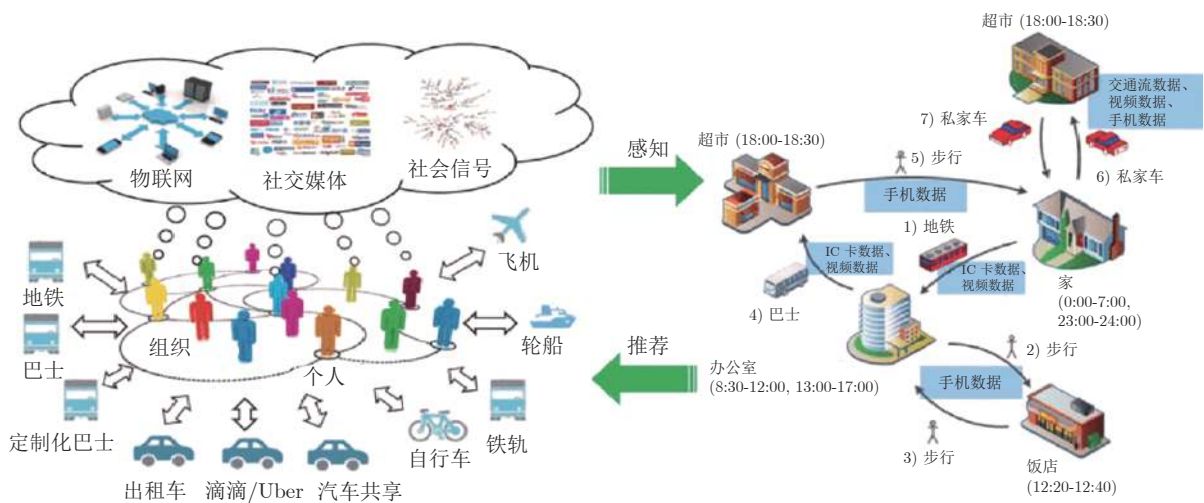


图 15 基于 CPSS 的平行交通系统^[10]

Fig.15 Parallel transportation system based on CPSS^[10]

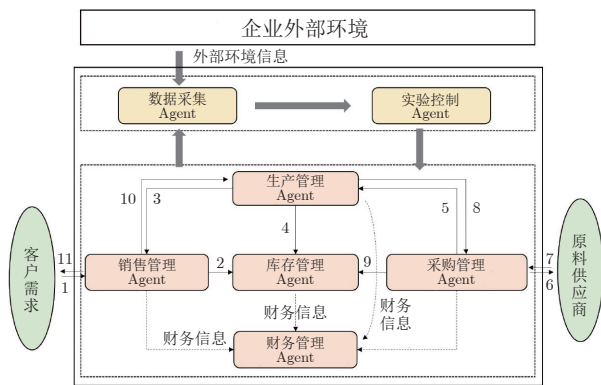


图 16 平行企业的基本运行流程^[110]

Fig. 16 The basic workflow of parallel enterprise^[110]

是包含医生、患者、医学设备等多种元素的复杂系统. 从“专业分工”到“人机分工”, 再到“虚实分工”是智慧医疗发展的必由之路. 如何对医院进行有效管理, 实现医护人员分工的转变, 平行医院给出了一个实施方案. 如图 17 所示, 平行医院^[115-116]将医院的基础设施和参与人员数字化、平行化, 引入数字人医生和机器人医生, 为患者提供可靠、可信、高效的医疗服务. 其中, 数字人医生是决策者和指挥者, 通过计算实验规划评估患者的医学治疗方案, 指挥机器人医生完成相关工作. 生物人医生负责医疗过程的整体把关, 具有整个过程的最高优先级, 能够修改数字人的决策、中断和改变机器人的行为. 针对具体手段和具体疾病, 平行医学的典型案例分析如平行手术^[117]、平行皮肤^[118]、平行高特^[119]、平行眼^[120]和平行肠胃^[121]等被提出来突破不同医护人员业务水平参差不齐的问题, 根据患者个体差异, 选择最佳诊疗方案.

4.5 平行生态与平行社会

生态系统由自然生态系统、社会生态系统以及人工生态系统组成. 人工生态系统也可以被称为数字生态系统或信息生态系统或知识生态系统^[122]. 农业系统是社会系统的重要组成部分, 是事关国家战略安全的核心产业之一. 但农业生产具有很强的不确定性和复杂性, 外界自然条件、市场环境、国家政策等都将对农业系统的运行产生巨大的影响. 为了实现包括管理和在内全产业链智能控制, 如图 18 所示, 平行农业对农作物生长、农田及温室环境、农事管理及农业经济等方面进行建模, 构建一个或多个平行农业系统, 进而预测作物在不同环境和管理下的生长趋势^[123]. 据此, 平行农业系统可以通过调整农业经营策略来引导农户的种植行为, 从而优化整体的农产品供求关系, 促进可持续农业的发展.

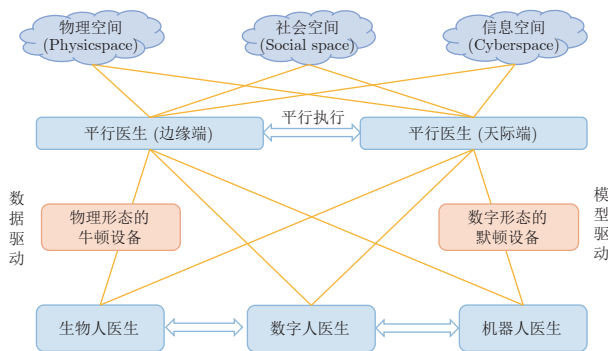


图 17 基于 CPSS 的平行医院系统^[115]

Fig. 17 The framework of parallel hospital^[115]

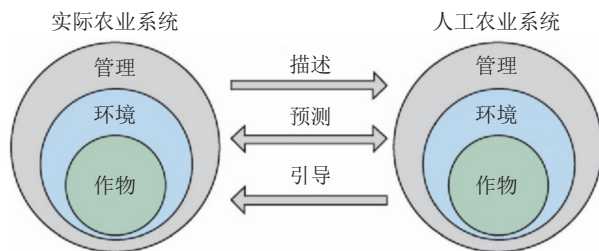


图 18 平行农业智能技术^[123]

Fig. 18 Parallel agriculture intelligence technology^[123]

城市作为一种典型的社会生态系统, 由人类、基础设施、社会关系以及环境等组成^[124-127]. 在平行城市^[128]和平行社会^[129]中, 像人、设备和宏观系统等一切事物都将有它的数字模型, 与物理实体共存或并行运行. 平行城市或平行社会系统可以将这些数字资产结合起来, 根据规划模拟城市或社会的运行过程, 选择最优方案, 以实现城市或社会的有效运行目标, 如城市基础设施的建设、公民活动的控制和管理等.

区块链可以被认为是人工生态系统的一种新型架构, 可以存储和分析网络大数据和社会信号. 区块链系统具有去中心化、不被篡改、公开透明的数据获取等特点^[130], 在数据隐私和安全方面发挥着无可替代的作用. 然而, 由于区块链系统固有的不确定性、多样性和复杂性, 对现有区块链框架的评价、优化和创新仍急需一种有效的方法. 基于 ACP 的平行区块链是这一思路的未来趋势之一. 平行区块链可以构建一个或多个平行区块链系统, 将人工区块链系统用作实验平台, 对特定区块链系统进行实验和试错, 进而对其进行优化, 避免直接在真实区块链系统上进行实验可能造成的负面结果. 平行区块链系统通过人工区块链和真实区块链的虚实交互和闭环反馈, 实现技术验证和策略寻优, 为区块链系统更好服务于实际场景, 提供必要的辅助.

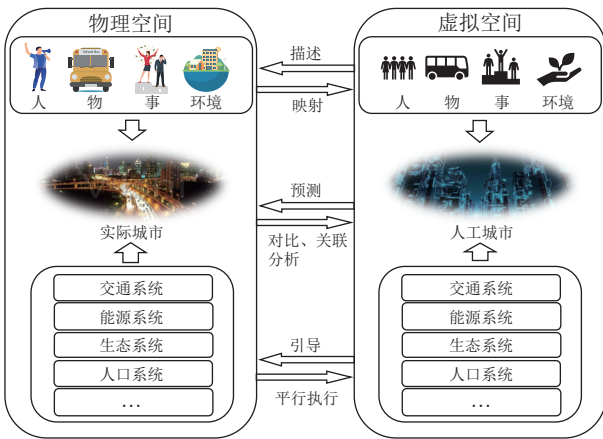


图 19 基于虚实互动的平行城市^[128]

Fig. 19 Parallel city with real-virtual interactions^[128]

4.6 平行经济系统与社会计算

随着社会机构资源数字化进程的不断加快和普及,大量的社会经济信息将实时动态地出现在决策者、研究者甚至是广大公众的面前. 这些信息影响范围广、传播速度快,必须对其实时进行充分地利用,使制定的决策具有实时性和完备性^[7]. 但这类问题是无法完全准确预测和分析的,具有社会复杂性和工程复杂性. 如何建立复杂的社会经济系统的计算理论和方法体系,是解决该问题的关键所在. 平行经济系统^[7]试图将研究复杂系统的计算理论与方法引入社会经济问题的研究中,以计算机为社会经济系统的实验室,将实验经济学方法与经济计算实验方法结合,融合人工社会、计算实验和平行系统,形成复杂社会经济问题的计算研究理论与体系.

信息-物理-社会三元空间的融合引发了数据规模的爆炸式增长和数据规模的高度复杂化^[131-132],大数据中包含充足的社会信号和政务信息,使面向社会的引导和控制成为可能,催生未来的新型社会管理产业^[133]. 如何借助各种新型信息技术手段创新社会服务管理,成为关乎国家繁荣发展与社会安全稳定的重大问题^[4]. 基于 ACP 的社会计算方法 (图 20),针对由动态网群组织参与并组织演化的社会服务执行及资源规划问题,构建人工社会系统与实际社会系统虚实互动,使来自物理世界和心理世界的相关知识及经验形式化、计算化和可视化,通过虚实互动、平行执行等方式实现社会系统的描述解析、预测推理、诱导学习及反馈的功能,进而完成灵活、聚焦和收敛的智慧社会管理目标^[133].

4.7 平行军事系统

近年来,伊拉克战争、叙利亚战争、格鲁吉亚战争、俄乌冲突等不断发生,世界形势动荡不安. 与传

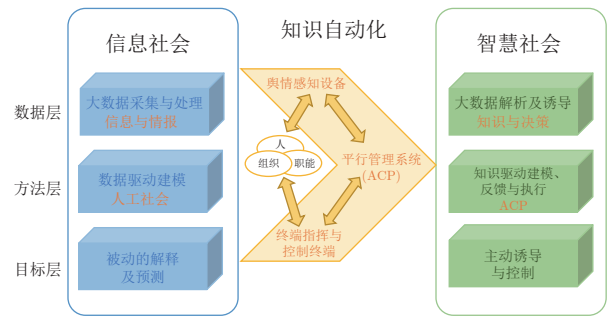


图 20 智慧社会的技术支持体系^[133]

Fig. 20 Technological framework of smart societies^[133]

统战争形态相比,现代战争形态发生了重大变化,战场横跨物理域、网络域和感知域,主要表现为以常规武器为核心的“明战”、以电子武器为核心的“暗战”以及以社会媒体为核心的“观战”^[63, 134],如图 21 所示. 如何结合明战、暗战、观战等形式,以实时化和常态化的方式综合物理域、网络域和感知域中的军事行动,是国家安全面临的重要问题^[135].

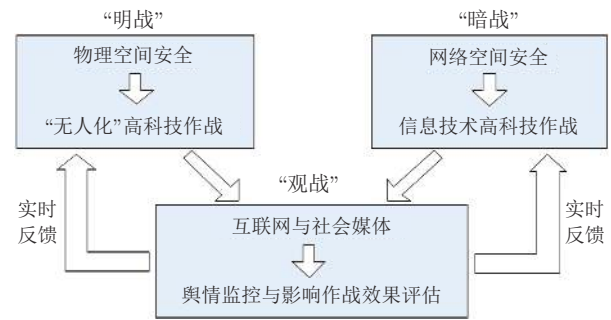


图 21 现代战争形态——明战、暗战、观战^[135]

Fig. 21 Modern war: Physical level, cyber level, social level^[135]

基于 ACP 的平行军事体系^[135]能够充分利用赛博空间所衍生的新理性界限和智力空间,统一在物理域、网络域、感知域中进行训练、作战、评估的可能途径,探索应对现代战争的新组织与行动方式. 平行武器系统^[136],如平行坦克^[137]、平行航母^[138]等,通过相应装备的虚实互动,能够高效利用武器系统,提升作战水平,是未来战争的重要辅助力量. 情报工作是众多军事和政治斗争取胜的法宝,而指挥与控制的成效往往是军事行动胜负的决定因素. 平行情报^[139]和平行指控^[54]为现代战争的情报和指挥与控制系统提供了新的发展理念和发展方向. 平行情报通过融合软件定义的智能情报体系和广泛存在的社会信号^[139],建立了一种新的情报体系. 平行指挥与控制^[54]借助 ACP 方法打破了传统军事系统中关于指挥与控制的理论、方法和资源限制,将人员、信

息、装备和使命紧密地联系在一起, 最终形成敏捷、聚焦、收敛的指挥控制体系。在新的世界形势下, 发展基于平行智能、开源情报和知识自动化的军事理论和方法体系, 能够变革现有军事组织及其指挥控制体系, 推动国防事业的不断发展。

4.8 平行认知与平行哲学

2016 年, AlphaGo 的巨大成功使得智能技术迅速吸引了极大的关注, 促使智能技术发展势头超过信息技术。而工业技术是实体经济的基础, 因此, 三种 IT 技术并存必然会是未来社会的常态。三种 IT 技术的并立背后有着深刻的哲学基础, 即卡尔·波普尔的“三个世界”的哲学理论。在该理论基础上, 王飞跃研究员针对迅猛发展的智能技术, 提出面向智能科技的平行哲学这一新的科学哲学理念^[140], 推动现有的过程哲学理论向着平行哲学理论转变, 实现从存在的 Being, 变化的 Becoming 到相信的 Believing。平行哲学 (图 22) 建立了关于描述知识、预测知识和引导知识的哲学系统^[141]。

平行思维和并行认知是平行哲学的基础。平行思维要求参与者针对同一问题, 在平行的思维“轨道”上尽可能提出不一样的观点, 从而避免对抗思维的负面影响。基于平行思维, 计算思维、平行学习、平行管理与控制等智能方法与技术被应用于社会物理信息系统, 从而创建知识自动化的文化和行为, 最终形成平行认知^[142-143], 推动智能科学与技术的发展。

5 未来展望

随着经济社会的不断发展, CPSS 的工程复杂性和社会复杂性都将同步提高, 相关技术和理论的不断发展和完善, 将会给社会生活的方方面面带来巨大的变革。其中, 基于 ACP 的平行智能方法将为

广泛存在的 CPSS 提供越来越重要的支撑和引领, 虚实互动合一将成为 CPSS 的主流发展趋势和形态。

1) 从描述到预测再到引导。对 CPSS 的分析和应用首先需要描述现实系统, 通过对现实系统的深刻理解和准确复刻, 构建其虚拟映射, 实现对 CPSS 中生产、生活等各环节的仿真。预测现实系统是 CPSS 的必然途径, 借助计算实验在虚拟世界中推演多种可能性, 在时间和空间两个维度拓展现实世界, 充分探索系统的状态-动作空间, 实现想象力和创造力的实体化。引导现实系统是 CPSS 的目标, CPSS 和平行智能方法最终要为现实世界服务, 将赛博空间中的理想结果及其实现路径作用于现实世界, 形成虚实互动的反馈, 最终使现实世界逐步趋近理想世界。

2) 从数字化到知识自动化再到智能化。目前生产端以 SaaS (Software as a service) 为特征的服务技术和系统初步实现了数字化。在基于平行智能的 CPSS 中, 数据、信息等将与任务和决策无缝、准确、及时、在线地整合起来, 从而自动完成各种知识功能与知识服务的知识自动化。进一步地, CPSS 将发展并建立包含人机物在内的多种不同智能实体之间语义层次的联结, 实现各智能体所拥有的知识之间的互联互通, 以知识协同的方式进行从原始经验数据的主动采集、知识获取、知识交换、知识关联, 到知识功能 (如推理、决策、规划、管控等) 的全自动化过程, 实现智能化。

3) 从仿真到模拟再到计算实验。随着工程与社会复杂性的提升, 现实 CPSS 世界的仿真实验越来越难以实施。因此必须使行为、经验和知识数字化、动态化、即时化, 这就是平行智能兴起的动力和使命。接下来将是游戏和动漫的科学化, 进而演化为计算实验, 使基于 ACP 的 CPSS 成为社会实验室,

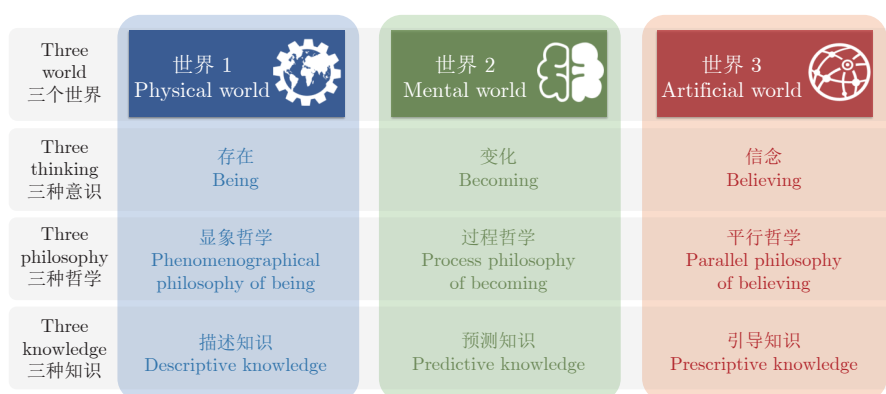


图 22 平行哲学及其引导知识体系^[141]

Fig. 22 Parallel philosophy: Process of parallel interaction and entanglement between virtual and real and correspondent prescriptive knowledge system^[141]

成为助力科学决策的科学手段. 未来,“游戏工程师”或“场景工程师”将成为时尚的新兴职业,或许演化为实验工程师和决策工程师等新的智业时代岗位,其工作就是从小数据生成大数据,再从大数据凝练出深智能或智数据(Smart data),实质是规划和监控虚实互动的“平行社会”,通过虚拟 CPSS 世界的游戏影响现实 CPSS 世界的行为,从而改变现实 CPSS 世界发展演化的方向.

4) 从人在回路到人机混合再到人机一体. 随着人类用户与 CPSS 的联系越来越紧密,人类和机器的融合程度会越来越高. 从较低层级的人在回路的技术形态逐步演化为人机混合的形态,人会常态化成为系统的一部分. 进一步发展到虚拟世界和现实世界结合,实现虚实融合,人类和机器的边界不再清晰,形成浑然一体的平行系统形态.

5) 平行智能必须与区块链智能、智能合约智能、DAO 和 DeSci 等组织技术、协调技术和执行技术深度结合,成为 DeEco 和 DeSoc 的生态技术和基础设施^[21, 144-147]. 同时,必须加速从特征分析和特征工程向场景工作与场景智能转化,使校定和认证(Calibration and certification, C&C)与鉴定和验证(Verification and validation, V&V)成为一般平行智能系统必须经过的检验步骤,形成新的智能产业形态和生态^[148-150].

在上述理论技术发展的基础上,基于平行智能的 CPSS 混合智能系统未来将在交通、能源、机器人、制造业和医疗保健等以人为主要的方向和领域中,发挥更重要的作用. 在关注理论技术发展的同时,服务于该系统的底层技术也需要得到相应的关注,例如,为 CPSS 而设计的操作系统和工具软件有利于更加高效地利用系统的软硬件资源;服务于 ACP 理论框架的智能算法等内容也值得更多的关注.

6 结语

新一代信息通信技术的迅猛发展,深刻地改变了人与环境、社会之间的关系. 由此产生的多样化的社交网络和在线社区,使人类社会与工程系统日益耦合,呈现出高度开放化、动态化以及交互化等特征. 必须以社会物理信息系统作为基础设施,通过物理空间和赛博空间,整合物理世界、心理世界和人工世界的各种信息和资源;并以 ACP 方法为技术手段,将物理系统的 UDC 转换成智能系统的 AFC,真正实现知识自动化的目标,迈向工业 5.0 时代. 本文介绍了社会物理信息系统和平行系统理论被提出的动机、国内早期发展以及关键元素与基本框架. 随后,介绍了通过 ACP 方法控制和管理社会物理信息系统的操作流程. 社会物理信息系统+

平行智能是实现复杂系统“收敛”与“涌现”矛盾对立与统一的一套重要方法论. 本文详细总结了该方法论在平行控制与智能控制等八个方面的应用成果,表明国内对于该方法论的研究已经形成了完整的研究体系. 最后,我们对社会物理信息系统的未来发展方向和技术趋势进行了讨论和展望. 我们认为社会物理信息系统+平行智能是通用人工智能工程化和商业化的有效范式,未来将进一步提升机器的智能化水平,进而变革社会的生产关系.

致谢

非常感谢赵伟教授提供宝贵参考材料. 借此机会,谨向长期以来参加 CPSS 项目研究的其他 QAI 和复杂系统管理与控制国家重点实验室研究人员表示衷心的感谢. 另外,国家自然科学基金委员会的重点项目“ERP3.0: 企业平行管理系统理论与关键技术研究(2013-2017)”和“基于 CPSS 的流程工业生产计划知识自动化系统及应用验证(2016-2020)”为平行智能与 CPSS 的发展提供了有力的资金支持,在此表示真诚的感谢.

References

- 1 Wang F Y. CAST Lab: A Cyber-social-physical Approach for Traffic Control and Transportation Management, ICSEC Technical Report, 1999
- 2 Wang Fei-Yue. On the modeling, analysis, control and management of complex systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2006, **3**(2): 26-34
(王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理. *复杂系统与复杂性科学*, 2006, **3**(2): 26-34)
- 3 Zhang J, Pan L, Han Q L, Chen C, Wen S, Xiang Y. Deep learning based attack detection for cyber-physical system cybersecurity: A survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, **9**(3): 377-391
- 4 Lucia W, Youssef A. A key-agreement scheme for cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(8): 5368-5373
- 5 Duo W L, Zhou M C, Abusorrah A. A survey of cyber attacks on cyber physical systems: Recent advances and challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, **9**(5): 784-800
- 6 Tyszbrowicz S, Faitelson D. Emergence in cyber-physical systems: Potential and risk. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, **21**(11): 1554-1566
- 7 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)
- 8 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)
- 9 Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: From CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85-88

- 10 Zhang J J, Wang F Y, Wang X, Xiong G, Zhu F H, Lv Y S, et al. Cyber-physical-social systems: The state of the art and perspectives. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2018, **5**(3): 829–840
- 11 Olaverri-Monreal C. Blockchain-based intelligent transportation systems: The human use of cyberphysical-social transportation systems [President's Message]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2022, **14**(6): Article No. 5
- 12 Wang Fei-Yue, Tang Shu-Ming. Concepts and frameworks of artificial transportation systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(2): 52–59
(王飞跃, 汤淑明. 人工交通系统的基本思想与框架体系. 复杂系统与复杂性科学, 2004, **1**(2): 52–59)
- 13 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
- 14 Wang F Y, Carley K M, Zeng D, Mao W J. Social computing: From social informatics to social intelligence. *IEEE Intelligent Systems*, 2007, **22**(2): 79–83
- 15 Wang F Y, Zeng D, Hendler J A, Zhang Q P, Feng Z, Gao Y Q, et al. A study of the human flesh search engine: Crowd-powered expansion of online knowledge. *Computer*, 2010, **43**(8): 45–53
- 16 Bemporad A, Bicchi A, Camacho E, De Prada C, Di Benedetto M D, Damm G. Systems and control recommendations for a European research agenda towards horizon 2020 [Online], available: <https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/kJZPeM-MtDQvc77R>, March 1, 2022
- 17 Lamnabhi-Lagarigue F, Annaswamy A, Engell S, Isaksson A, Khargonekar P, Murray R M, et al. Systems & control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges. *Annual Reviews in Control*, 2017, **43**: 1–64
- 18 Netto M, Spurgeon S K. Special section on cyber-physical & human systems (CPHS). *Annual Reviews in Control*, 2017, **44**: 249–251
- 19 Smirnov A, Kashevnik A, Shilov N, Makklya A, Gusikhin O. Context-aware service composition in cyber physical human system for transportation safety. In: Proceedings of the 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). Tampere, Finland: IEEE, 2013. 139–144
- 20 Wang F Y. Parallel intelligence in metaverses: Welcome to Hanoi!. *IEEE Intelligent Systems*, 2022, **37**(1): 16–20
- 21 Wang X, Yang J, Han J P, Wang W, Wang F Y. Metaverses and DeMetaverses: From digital twins in CPS to parallel intelligence in CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2022, **37**(4): 97–102
- 22 Wang F Y. Control 5.0: From Newton to Merton in Popper's cyber-social-physical spaces. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(3): 233–234
- 23 Wang Fei-Yue. A framework for social signal processing and analysis: From social sensing networks to computational dialectical analytics. *Scientia Sinica Informationis*, 2013, **43**(12): 1598–1611
(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. 中国科学: 信息科学, 2013, **43**(12): 1598–1611)
- 24 Wang F Y. A big-data perspective on AI: Newton, Merton, and analytics intelligence. *IEEE Intelligent Systems*, 2012, **27**(5): 2–4
- 25 Wang F Y. Shadow Systems: A New Concept for Nested and Embedded Co-Simulation for Intelligent Systems, University of Arizona, USA, 1994
- 26 Wang F Y, Wang X, Li L X, Li L. Steps toward parallel intelligence. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(4): 345–348
- 27 Wang F Y, Zhang J J, Wang X. Parallel intelligence: Toward lifelong and eternal developmental AI and learning in cyber-physical-social spaces. *Frontiers of Computer Science*, 2018, **12**(3): 401–405
- 28 Wang F Y. Beyond X 2.0: Where should we go? *IEEE Intelligent Systems*, 2009, **24**(3): 2–4
- 29 Wang X, Zheng X H, Zhang Q P, Wang T, Shen D Y. Crowdsourcing in ITS: The state of the work and the networking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(6): 1596–1605
- 30 Wang Fei-Yue. From nothing to everything: An investigation on research of artificial societies and complex systems. *Science Times*, 2004-03-17
(王飞跃. 从一无所有到万象所归: 人工社会与复杂系统研究. 科学时报, 2004-03-17)
- 31 Wang Fei-Yue. Social Computing and Prototype Systems Development for Key Projects in CAS, Chinese Academy of Sciences Reports of Major Projects, 2004
(王飞跃. 社会计算与情报和安全信息学原型系统的研发, 中国科学院重大项目报告, 2004)
- 32 Feng Z. A Behavioral Study of Chinese Online Human Flesh Communities: Modeling and Analysis With Social Networks [Ph.D. dissertation], University of Arizona, USA, 2012
- 33 Zhang Q P. Analyzing Cyber-Enabled Social Movement Organizations: A Case Study With Crowd-powered Search [Ph.D. dissertation], University of Arizona, USA, 2012
- 34 Wang Fei-Yue. A Brief History of Human Flesh Search: From Crowdsourcing to Cyber Movement Organizations, SKL-MCCS Technical Report, 2011
(王飞跃. 人肉搜索十年简史: 从众包到动态网群组织, 复杂系统管理与控制国家重点实验室技术报告, 2011)
- 35 Zhang Q P, Wang F Y, Zeng D, Wang T. Understanding crowd-powered search groups: A social network perspective. *PLoS One*, 2012, **7**(6): Article No. e39749
- 36 Zhao W, Abdelzaher T. Preface to the special issue: Toward an efficient and effective internet of things for cyber-physical systems. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2018, **2**(2): Article No. 7
- 37 Zhao W. CPS: A New Academic Discipline and Its Networking Challenges, Technical Report, American University of Sharjah, 2019
- 38 Strategic Research Group for National and Public Security Technology, CAS. *National and Public Technology in China: A Roadmap to 2050*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.
(中国科学院国家与公共安全领域战略研究组. 中国至 2050 年国家与公共安全科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.)
- 39 Strategic Research Group for Information Technology, CAS. *Information Science & Technology in China: A Roadmap to 2050*. Beijing: Science Press, 2009.
(中国科学院信息领域战略研究组. 中国至 2050 年信息科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.)
- 40 Strategic Research Group for Advanced Manufacturing Technology, CAS. *Advanced Manufacturing Technology in China: A Roadmap to 2050*. Beijing: Science Press, 2009.
(中国科学院先进制造领域战略研究组. 中国至 2050 年先进制造科技发展路线图. 北京: 科学出版社, 2009.)
- 41 Zhou J, Zhou Y H, Wang B C, Zang J Y. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing. *Engineering*, 2019, **5**(4): 624–636
- 42 Liu Z M, Wang J. Human-cyber-physical systems: Concepts, challenges, and research opportunities. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, **21**(11): 1535–1553
- 43 Li L, Wang X, Wang K F, Lin Y L, Xin J M, Chen L, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction. *Science Robotics*, 2019, **4**(28): Article No. eaaw4106
- 44 Wang Kun-Feng, Lu Yue, Wang Yu-Tong, Xiong Zi-Wei, Wang Fei-Yue. Parallel imaging: A new theoretical framework for image generation. *Pattern Recognition and Artificial Intelli-*

- gence, 2017, **30**(7): 577–587
(王坤峰, 鲁越, 王雨桐, 熊子威, 王飞跃. 平行图像: 图像生成的一个新型理论框架. 模式识别与人工智能, 2017, **30**(7): 577–587)
- 45 Sun Wei-Qing, Zheng Yu-Qi. Energy 5.0: Stepping into a parallel era of virtuality and reality interaction. *Process Automation Instrumentation*, 2020, **41**(1): 1–9, 15
(孙伟卿, 郑钰琦. 能源 5.0: 迈入虚实互动的平行化时代. 自动化仪表, 2020, **41**(1): 1–9, 15)
- 46 Lv Yi-Sheng, Chen Yuan-Yuan, Jin Jun-Chen, Li Zhen-Jiang, Ye Pei-Jun, Zhu Feng-Hua. Parallel transportation: Virtual-real interaction for intelligent traffic management and control. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, **1**(1): 21–33
(吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 李镇江, 叶佩军, 朱风华. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制. 智能科学与技术学报, 2019, **1**(1): 21–33)
- 47 Wang S, Xiao P S, Chai H F, Tu X J, Sun Q, Cai H, et al. Research on construction of supply chain financial platform based on blockchain technology. In: Proceedings of the IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Beijing, China: IEEE, 2021. 42–45
- 48 Qin Rui-Lin, Zhou Chang-Le, Chao Fei. A survey on machine consciousness. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(1): 18–34
(秦瑞琳, 周昌乐, 晁飞. 机器意识研究综述. 自动化学报, 2021, **47**(1): 18–34)
- 49 Yu Hong, He De-Niu, Wang Guo-Yin, Li Jie, Xie Yong-Fang. Big data for intelligent decision making. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(5): 878–896
(于洪, 何德牛, 王国胤, 李劫, 谢永芳. 大数据智能决策. 自动化学报, 2020, **46**(5): 878–896)
- 50 Zhang T, Cong Y, Dong J H, Hou D D. Partial visual-tactile fused learning for robotic object recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(7): 4349–4361
- 51 Yu Xin-Yi, Wang Zheng-An, Wu Jia-Xin, Ou Lin-Lin. System design for human-robot coexisting environment satisfying multiple interaction tasks. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(9): 2265–2276
(禹鑫懿, 王正安, 吴加鑫, 欧林林. 满足不同交互任务的人机共融系统设计. 自动化学报, 2022, **48**(9): 2265–2276)
- 52 Jin Zhe-Hao, Liu An-Dong, Yu Li. Hierarchical human-robot cooperative control based on GPR and DRL. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(9): 2352–2360
(金哲豪, 刘安东, 俞立. 基于 GPR 和深度强化学习的分层人机协作控制. 自动化学报, 2022, **48**(9): 2352–2360)
- 53 Xue J R, Hu B, Li L X, Zhang J P. Human-machine augmented intelligence: Research and applications. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2022, **23**(8): 1139–1141
- 54 Wang Fei-Yue. CC5.0: Intelligent command and control systems in the parallel age. *Journal of Command and Control*, 2015, **1**(1): 107–120
(王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系. 指挥与控制学报, 2015, **1**(1): 107–120)
- 55 Wang Fei-Yue. Software-defined systems and knowledge automation: A parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 1–8
(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. 自动化学报, 2015, **41**(1): 1–8)
- 56 Lü J H, Wen G H, Lu R Q, Wang Y, Zhang S M. Networked knowledge and complex networks: An engineering view. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, **9**(8): 1366–1383
- 57 Cheng L F, Yu T, Zhang X S, Yang B. Parallel cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and knowledge automation: Concepts, architectures, and challenges. *IEEE Intelligent Systems*, 2019, **34**(2): 54–64
- 58 Li L, Lin Y L, Zheng N N, Wang F Y. Parallel learning: A perspective and a framework. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(3): 389–395
- 59 Miao Q H, Lv Y S, Huang M, Wang X, Wang F Y. Parallel learning: Overview and perspective for computational learning across Syn2Real and Sim2Real. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, **10**(3): 603–631
- 60 Wang F Y, Zhang J J, Zheng X H, Wang X, Yuan Y, Dai X X, et al. Where does AlphaGo go: From Church-Turing thesis to AlphaGo thesis and beyond. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(2): 113–120
- 61 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
- 62 Wang X, Li L X, Yuan Y, Ye P J, Wang F Y. ACP-based social computing and parallel intelligence: Societies 5.0 and beyond. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2016, **1**(4): 377–393
- 63 Yang Lin-Yao, Chen Si-Yuan, Wang Xiao, Zhang Jun, Wang Cheng-Hong. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(11): 2001–2031
(杨林瑶, 陈思远, 王晓, 张俊, 王成红. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望. 自动化学报, 2019, **45**(11): 2001–2031)
- 64 Tian Yong-Lin, Shen Yu, Li Qiang, Wang Fei-Yue. Parallel point clouds: Point clouds generation and 3D model evolution via virtual-real interaction. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(12): 2572–2582
(田永林, 沈宇, 李强, 王飞跃. 平行点云: 虚实互动的点云生成与三维模型进化方法. 自动化学报, 2020, **46**(12): 2572–2582)
- 65 Wu C J, Hamada M S. *Experiments: Planning, Analysis, and Optimization (3rd edition)*. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- 66 Meng Xiang-Bing, Wang Rong, Zhang Mei, Wang Fei-Yue. Parallel perception: An ACP-based approach to visual SLAM. *Journal of Command and Control*, 2017, **3**(4): 350–358
(孟祥冰, 王蓉, 张梅, 王飞跃. 平行感知: ACP 理论在视觉 SLAM 技术中的应用. 指挥与控制学报, 2017, **3**(4): 350–358)
- 67 Wang Fei-Yue. Parallel control: A method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293–302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293–302)
- 68 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)
- 69 Wang Fei-Yue, Meng Xiang-Bing, Du Si-Cong, Geng Zheng. Parallel light field: The framework and processes. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, **3**(1): 110–122
(王飞跃, 孟祥冰, 杜思聪, 耿征. 平行光场: 基本框架与流程. 智能科学与技术学报, 2021, **3**(1): 110–122)
- 70 Wang K, Gou C, Zheng N, Reh J M, Wang F Y. Parallel vision for perception and understanding of complex scenes: methods, framework, and perspectives. *Artificial Intelligence Review*, 2017, **48**: 299–329
- 71 Li X, Wang K F, Tian Y L, Yan L, Deng F, Wang F Y. The ParallelEye dataset: A large collection of virtual images for traffic vision research. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, **20**(6): 2072–2084
- 72 Li X, Wang Y T, Yan L, Wang K F, Deng F, Wang F Y. ParallelEye-CS: A new dataset of synthetic images for testing the visual intelligence of intelligent vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, **68**(10): 9619–9631
- 73 Wang Fei-Yue, Wei Qing-Lai. Intelligent control: From learning control to parallel control. *Control Theory & Applications*, 2018, **35**(7): 939–948

- (王飞跃, 魏庆来. 智能控制: 从学习控制到平行控制. 控制理论与应用, 2018, **35**(7): 939–948)
- 74 Wei Q L, Wang L X, Lu J W, Wang F Y. Discrete-time self-learning parallel control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(1): 192–204
- 75 Li L, Zheng N N, Wang F Y. On the crossroad of artificial intelligence: A revisit to Alan Turing and Norbert Wiener. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, **49**(10): 3618–3626
- 76 Wang F Y, Zheng N N, Li L, Xin J M, Wang X, Xu L H, et al. China's 12-year quest of autonomous vehicular intelligence: The intelligent vehicles future challenge program. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2021, **13**(2): 6–19
- 77 Laidi R, Djenouri D, Balasingham I. On predicting sensor readings with sequence modeling and reinforcement learning for energy-efficient IOT applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(8): 5140–5151
- 78 Wang Ting, Xu Xiao-Quan, Tang Xiao-Ming, Huang Qing-Qing, Li Yong-Fu. Precise clock synchronization in industrial internet of things: Networked control perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(7): 1720–1738
(王颀, 徐小权, 唐晓铭, 黄庆卿, 李永福. 工业物联网中的精确时钟同步: 网络化控制理论观点. 自动化学报, 2021, **47**(7): 1720–1738)
- 79 Lu J W, Wang X X, Cheng X, Yang J, Kwan O, Wang X. Parallel factories for smart industrial operations: From big AI models to field foundational models and scenarios engineering. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, **9**(12): 2079–2086
- 80 Bai Tian-Xiang, Shen Zhen, Liu Ya-Ting, Dong Xi-Song. Parallel machine: A framework for the control and management for intelligent machines. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, **1**(2): 181–191
(白天翔, 沈震, 刘雅婷, 董西松. 平行机器: 一种智能机器的管理与控制框架. 智能科学与技术学报, 2019, **1**(2): 181–191)
- 81 Wang Fei-Yue, Gao Yan-Chen, Shang Xiu-Qin, Zhang Jun. Parallel manufacturing and industries 5.0: From virtual manufacturing to intelligent manufacturing. *Science & Technology Review*, 2018, **36**(21): 10–22
(王飞跃, 高彦臣, 商秀芹, 张俊. 平行制造与工业 5.0: 从虚拟制造到智能制造. 科技导报, 2018, **36**(21): 10–22)
- 82 Li S M, Wang Y T, Wang X, Wang F Y. Mechanical design paradigm based on ACP method in parallel manufacturing. In: Proceedings of the IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Beijing, China: IEEE, 2021. 1–4
- 83 Pu Zhi-Qiang, Yi Jian-Qiang, Liu Zhen, Qiu Teng-Hai, Sun Jin-Lin, Li Fei-Mo. Knowledge-based and data-driven integrating methodologies for collective intelligence decision making: A survey. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(3): 627–643
(蒲志强, 易建强, 刘振, 丘腾海, 孙金林, 李非墨. 知识和数据协同驱动的群体智能决策方法研究综述. 自动化学报, 2022, **48**(3): 627–643)
- 84 Yang J, Wang X X, Zhao Y D. Parallel manufacturing for industrial metaverses: A new paradigm in smart manufacturing. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, **9**(12): 2063–2070
- 85 Yang J, Li S M, Wang X X, Lu J W, Wu H Y, Wang X. De-FACT in ManuVerse for parallel manufacturing: Foundation models and parallel workers in smart factories. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, DOI: 10.1109/TSMC.2022.3228817
- 86 Bai Tian-Xiang, Wang Shuai, Shen Zhen, Cao Dong-Pu, Zheng Nan-Ning, Wang Fei-Yue. Parallel robotics and parallel unmanned systems: Framework, structure, process, platform and applications. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 161–175
(白天翔, 王帅, 沈震, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用. 自动化学报, 2017, **43**(2): 161–175)
- 87 Chen Long, Yuwen Xuan, Cao Dong-Pu, Li Li, Wang Fei-Yue. Parallel unmanned system. *Unmanned Systems Technology*, 2018, **1**(1): 23–37
(陈龙, 宇文旋, 曹东璞, 李力, 王飞跃. 平行无人系统. 无人系统技术, 2018, **1**(1): 23–37)
- 88 Zhang J J, Gao D W, Zhang Y C, Wang X, Zhao X Y, Duan D L, et al. Social energy: Mining energy from the society. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(3): 466–482
- 89 Huang Bo-Nan, Wang Yong, Li Yu-Shuai, Liu Xin-Rui, Yang Chao. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy systems based on distributed neurodynamic optimization. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(7): 1718–1736
(黄博南, 王勇, 李玉帅, 刘鑫蕊, 杨超. 基于分布式神经动态优化的综合能源系统多目标优化调度. 自动化学报, 2022, **48**(7): 1718–1736)
- 90 Tang Hao, Liu Chang, Yang Ming, Tang Bi-Qiang, Xu Dan, Lv Kai. Learning-based optimization of active distribution system dispatch in industrial park considering the peak operation demand of power grid. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(10): 2449–2463
(唐昊, 刘畅, 杨明, 汤必强, 许丹, 吕凯. 考虑电网调峰需求的工业园区主动配电系统调度学习优化. 自动化学报, 2021, **47**(10): 2449–2463)
- 91 Zhang Jiang-Feng, Wang Fei-Yue, Su Ye, Chen Bo, Wang Zi-Xiang, Sun Jian-Dong, et al. Research on power grid primary frequency control ability parallel computing based on multi-source data. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(6): 1493–1503
(张江丰, 王飞跃, 苏烨, 陈波, 汪自翔, 孙坚栋, 等. 基于多源数据的电网一次调频能力平行计算研究. 自动化学报, 2022, **48**(6): 1493–1503)
- 92 Liu Jin-Chang, Yang De-Sheng, Sun Fei, Wu Hong-Xia. Parallel grid system framework research. *Electric Power ICT*, 2016, **14**(8): 7–13
(刘金长, 杨德胜, 孙飞, 吴红侠. 平行电网体系框架研究. 电力信息与通信技术, 2016, **14**(8): 7–13)
- 93 Hou Jia-Chen, Dong Xi-Song, Xiong Gang, Zhang Jun, Tan Ke. Parallel nuclear power: Intelligent technology for smart nuclear power. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, **1**(2): 192–201
(侯家琛, 董西松, 熊刚, 张俊, 谭珂. 平行核电: 迈向智慧核电的智能技术. 智能科学与技术学报, 2019, **1**(2): 192–201)
- 94 Wang Fei-Yue, Jiang Huai-Guang. Parallel battery: The framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, **3**(4): 521–531
(王飞跃, 蒋怀光. 平行电池: 智能生态化电池技术与服务体系的框架和流程. 智能科学与技术学报, 2021, **3**(4): 521–531)
- 95 Chen L, Hu X M, Wang G, Cao D P, Li L X, Wang F Y. Parallel mining operating systems: From digital twins to mining intelligence. In: Proceedings of the IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Beijing, China: IEEE, 2021. 469–473
- 96 Yang Jian-Jian, Ge Shi-Rong, Wang Fei-Yue, Luo Wen-Jie, Zhang Yu-Chen, Hu Xing-Tao, et al. Parallel tunneling: Intelligent control and key technologies for tunneling, supporting and anchoring based on ACP theory. *Journal of China Coal Society*, 2021, **46**(7): 2100–2111
(杨健健, 葛世荣, 王飞跃, 罗文杰, 张雨晨, 胡兴涛, 等. 平行掘进: 基于 ACP 理论的掘-支-锚智能控制理论与关键技术. 煤炭学报, 2021, **46**(7): 2100–2111)
- 97 Kumaravel S D, Malikopoulos A A, Ayyagari R. Optimal coordination of platoons of connected and automated vehicles at signal-free intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, **7**(2): 186–197
- 98 Wang X, Tang K, Dai X Y, Xu J T, Xi J H, Ai R, et al. Safety-balanced driving-style aware trajectory planning in intersection scenarios with uncertain environment. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, DOI: 10.1109/TIV.2023.3239903
- 99 Liu Xiao-Bo, Liu Peng, Cai Zhi-Hua, Qiao Yu-Lin, Wang Ling,

- Wang Min. Research progress of optical remote sensing image object detection based on deep learning. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(9): 2078–2089
(刘小波, 刘鹏, 蔡之华, 乔禹霖, 王凌, 汪敏. 基于深度学习的光学遥感图像目标检测研究进展. 自动化学报, 2021, **47**(9): 2078–2089)
- 100 Ding Fei, Zhang Nan, Li Sheng-Bo, Bian You-Gang, Tong En, Li Ke-Qiang. A survey of architecture and key technologies of intelligent connected vehicle-road-cloud cooperation system. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(12): 2863–2885
(丁飞, 张楠, 李升波, 边有钢, 童恩, 李富强. 智能网联车路云协同系统架构与关键技术研究综述. 自动化学报, 2022, **48**(12): 2863–2885)
- 101 Gao T Z, Pan H H, Gao H J. Monocular 3D object detection with sequential feature association and depth hint augmentation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, **7**(2): 240–250
- 102 Wang F Y. Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2008, **23**(6): 8–13
- 103 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
- 104 Wang F Y. Scanning the issue. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(5): 2310–2317
- 105 Yuan Jing-Ni, Yang Lin, Tang Xiao-Feng, Chen Ao-Wen. Autonomous vehicle motion planning based on improved RRT* algorithm and trajectory optimization. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(12): 2941–2950
(袁静妮, 杨林, 唐晓峰, 陈傲文. 基于改进 RRT* 与行驶轨迹优化的智能汽车运动规划. 自动化学报, 2022, **48**(12): 2941–2950)
- 106 Ding L, Terwilliger J, Sherony R, Reimer B, Fridman L. Value of temporal dynamics information in driving scene segmentation. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, **7**(1): 113–122
- 107 Xu Z R, Jiao X H. Robust control of connected cruise vehicle platoon with uncertain human driving reaction time. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, **7**(2): 368–376
- 108 Liu Xiao-Yu, Xun Jing, Gao Shi-Gen, Yin Jia-Teng. Robust self-triggered model predictive control for accurate stopping of high-speed trains. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(1): 171–181
(刘晓宇, 荀径, 高士根, 阴佳腾. 高速列车精确停车的鲁棒自触发预测控制. 自动化学报, 2022, **48**(1): 171–181)
- 109 Zhou C X, Liu Y Z, Sun Q S, Lasang P. Vehicle detection and disparity estimation using blended stereo images. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2021, **6**(4): 690–698
- 110 Qin Rui, Zeng Shuai, Li Juan-Juan, Yuan Yong. Parallel enterprises resource planning based on deep reinforcement learning. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(9): 1588–1596
(秦蕊, 曾帅, 李娟娟, 袁勇. 基于深度强化学习的平行企业资源计划. 自动化学报, 2017, **43**(9): 1588–1596)
- 111 Lv Qing, Zhao Kui, Cao Ji-Long, Wei Jing-Feng. Research and prediction of lung diseases based on text and images. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(2): 531–538
(吕晴, 赵奎, 曹吉龙, 魏景峰. 基于文本与图像的肺疾病研究与预测. 自动化学报, 2022, **48**(2): 531–538)
- 112 Fan Jia-Wei, Zhang Ru-Ru, Lu Meng, He Jia-Wen, Kang Xiao-Yang, Chai Wen-Jun, et al. Applications of deep learning techniques for diabetic retinal diagnosis. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(5): 985–1004
(范家伟, 张如如, 陆萌, 何佳雯, 康霄阳, 柴文俊, 等. 深度学习方法在糖尿病视网膜病变诊断中的应用. 自动化学报, 2021, **47**(5): 985–1004)
- 113 Wang Fei-Yue. Parallel medicine: From warmness of medicare to medicine of smartness. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, **3**(1): 1–9
(王飞跃. 平行医学: 从医学的温度到智慧的医学. 智能科学与技术学报, 2021, **3**(1): 1–9)
- 114 Wang Fei-Yue, Jin Zheng-Yu, Gou Chao, Shen Tian-Yu, Zheng Wen-Bo, Wang Jian-Gong, et al. ACP-based parallel medical imaging for intelligent analytics and applications. *Chinese Journal of Radiology*, 2021, **55**(3): 309–315
(王飞跃, 金征宇, 苟超, 沈甜雨, 郑文博, 王建功, 等. 基于 ACP 方法的平行医学图像智能分析及其应用. 中华放射学杂志, 2021, **55**(3): 309–315)
- 115 Wang Fei-Yue. Digital doctors and parallel healthcare: From medical knowledge automation to intelligent metasystems medicine. *Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital*, 2021, **12**(6): 829–833
(王飞跃. 数字医生与平行医疗: 从医疗知识自动化到系统化智能医学. 协和医学杂志, 2021, **12**(6): 829–833)
- 116 Wang Yong-Jun, Wang Fei-Yue, Wang Ge, Wang Xiao, Wang Yi-Long, Li Rui. Parallel hospitals: From hospital information system (HIS) to hospital smart operating system (HSOS). *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(11): 2585–2599
(王拥军, 王飞跃, 王戈, 王晓, 王伊龙, 李瑞. 平行医院: 从医院信息管理系统到智慧医院操作系统. 自动化学报, 2021, **47**(11): 2585–2599)
- 117 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)
- 118 Wang Fei-Yue, Gou Chao, Wang Jian-Gong, Shen Tian-Yu, Zheng Wen-Bo, Yu Hui. Parallel skin: A vision-based dermatological analysis framework. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019, **32**(7): 577–588
(王飞跃, 苟超, 王建功, 沈甜雨, 郑文博, 于慧. 平行皮肤: 基于视觉的皮肤病分析框架. 模式识别与人工智能, 2019, **32**(7): 577–588)
- 119 Wang Fei-Yue, Li Chang-Gui, Guo Yuan-Yuan, Wang Jing, Wang Xiao, Qiu Tian-Yu, et al. Parallel gout: An ACP-based system framework for gout diagnosis and treatment. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2017, **30**(12): 1057–1068
(王飞跃, 李长贵, 国元元, 王静, 王晓, 邱天雨, 等. 平行高特: 基于 ACP 的平行痛风诊疗系统框架. 模式识别与人工智能, 2017, **30**(12): 1057–1068)
- 120 Wang Fei-Yue, Zhang Mei, Meng Xiang-Bing, Wang Yan, Ma Jiao-Nan, Liu Wu, et al. Parallel eyes: An ACP-based smart ophthalmic diagnosis and treatment. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2018, **31**(6): 495–504
(王飞跃, 张梅, 孟祥冰, 王雁, 马娇楠, 刘武, 等. 平行眼: 基于 ACP 的智能眼科诊疗. 模式识别与人工智能, 2018, **31**(6): 495–504)
- 121 Zhang Mei, Chen Ling, Wang Fei-Yue, Wang Xiao, Guo Yuan-Yuan, Wang Tian. Parallel gastrointestinal: An ACP-based approach for intelligent operations. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2019, **32**(12): 1061–1071
(张梅, 陈翎, 王飞跃, 王晓, 国元元, 杨田. 平行胃肠: 基于 ACP 的智能胃肠疾病诊疗. 模式识别与人工智能, 2019, **32**(12): 1061–1071)
- 122 Wang F Y, Wang Y F. Parallel ecology for intelligent and smart cyber-physical-social systems. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2020, **7**(6): 1318–1323
- 123 Kang Meng-Zhen, Wang Xiu-Juan, Hua Jing, Wang Hao-Yu, Wang Fei-Yue. Parallel agriculture: Intelligent technology toward smart agriculture. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, **1**(2): 107–117
(康孟珍, 王秀娟, 华净, 王浩宇, 王飞跃. 平行农业: 迈向智慧农业的智能技术. 智能科学与技术学报, 2019, **1**(2): 107–117)
- 124 Han Hong-Gui, Zhang Lu, Lu Wei, Qiao Jun-Fei. Research on dynamic multiobjective intelligent optimal control for municipal wastewater treatment process. *Acta Automatica Sinica*,

- 2021, **47**(3): 620–629
(韩红桂, 张璐, 卢薇, 乔俊飞. 城市污水处理过程动态多目标智能优化控制研究. 自动化学报, 2021, **47**(3): 620–629)
- 125 Zhao Chun-Hui, Hu Yun-Yun, Zheng Jia-Le, Chen Jun-Hao. Data-driven operating monitoring for coal-fired power generation equipment: The state of the art and challenge. *Acta Automatica Sinica*, 2022, **48**(11): 2611–2633
(赵春晖, 胡赞响, 郑嘉乐, 陈军豪. 数据驱动的燃煤发电装备运行工况监控 —— 现状与展望. 自动化学报, 2022, **48**(11): 2611–2633)
- 126 Han Hong-Gui, Zhang Lin-Lin, Wu Xiao-Long, Qiao Jun-Fei. Data-knowledge driven multiobjective optimal control for municipal wastewater treatment process. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(11): 2538–2546
(韩红桂, 张琳琳, 伍小龙, 乔俊飞. 数据和知识驱动的城市污水处理过程多目标优化控制. 自动化学报, 2021, **47**(11): 2538–2546)
- 127 Yang Q M, Cao W W, Meng W C, Si J. Reinforcement-learning-based tracking control of waste water treatment process under realistic system conditions and control performance requirements. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(8): 5284–5294
- 128 Lv Yi-Sheng, Wang Fei-Yue, Zhang Yu, Zhang Xiao-Dong. Parallel cities: Framework, methodology, and application. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, **1**(3): 311–317
(吕宜生, 王飞跃, 张宇, 张晓东. 虚实互动的平行城市: 基本框架、方法与应用. 智能科学与技术学报, 2019, **1**(3): 311–317)
- 129 Wang F Y, Qin R, Li J J, Yuan Y, Wang X. Parallel societies: A computing perspective of social digital twins and virtual-real interactions. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2020, **7**(1): 2–7
- 130 Ramanan P, Li D, Gebrael N. Blockchain-based decentralized replay attack detection for large-scale power systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(8): 4727–4739
- 131 Chen W, Zhang T Y, Zhu H Y, Wang X M, Wang Y H. Perspectives on cross-domain visual analysis of cyber-physical-social big data. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, **22**(12): 1559–1564
- 132 Yu H, Cai H M, Liu Z Y, Xu B Y, Jiang L H. An automated metadata generation method for data lake of industrial WoT applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, **52**(8): 5235–5248
- 133 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)
- 134 Shi Wei, Feng Yang-He, Cheng Guang-Quan, Huang Hong-Lan, Huang Jin-Cai, Liu Zhong, et al. Research on multi-aircraft cooperative air combat method based on deep reinforcement learning. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(7): 1610–1623
(施伟, 冯扬扬, 程光权, 黄红蓝, 黄金才, 刘忠, 等. 基于深度强化学习的多机协同空战方法研究. 自动化学报, 2021, **47**(7): 1610–1623)
- 135 Wang Fei-Yue. The organizations and operations of wars in cyberspace: A discussion on parallel military systems. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2012, **26**(3): 5–10
(王飞跃. 面向赛博空间的战争组织与行动: 关于平行军事体系的讨论. 军事运筹与系统工程, 2012, **26**(3): 5–10)
- 136 Bai Tian-Xiang, Wang Shuai, Zhao Xue-Liang, Qin Ji-Rong. Parallel weapons: Weapons towards intelligent warfare. *Journal of Command and Control*, 2017, **3**(2): 89–98
(白天翔, 王帅, 赵学亮, 秦继荣. 平行武器: 迈向智能战争的武器. 指挥与控制学报, 2017, **3**(2): 89–98)
- 137 Xing Yang, Liu Zhong-Min, Liu Teng, Qin Ji-Rong, Bao Zhan, Wang Fei-Yue. Parallel tanks: Defining a digital quadruplet for smart tank systems. *Journal of Command and Control*, 2018, **4**(2): 111–120
(邢阳, 刘忠民, 刘腾, 秦继荣, 包战, 王飞跃. 平行坦克的数字四胞胎结构及其核心技术. 指挥与控制学报, 2018, **4**(2): 111–120)
- 138 Yang Dong-Sheng, Wang Kun-Feng, Chen De-Wang, Bao Zhan, Su Zhen-Dong, Wang Rui, et al. Parallel carrier fleets: From digital architectures to smart formations. *Journal of Command and Control*, 2018, **4**(2): 101–110
(阳东升, 王坤峰, 陈德旺, 包战, 苏振东, 王睿, 等. 平行航母: 从数字航母到智能航母. 指挥与控制学报, 2018, **4**(2): 101–110)
- 139 Wang Fei-Yue. Intelligence 5.0: Parallel intelligence in parallel age. *Journal of the China Society for Scientific and Technical Information*, 2015, **34**(6): 563–574
(王飞跃. 情报 5.0: 平行时代的平行情报体系. 情报学报, 2015, **34**(6): 563–574)
- 140 Wang Fei-Yue. Parallel philosophy and intelligent science: From Leibniz's Monad to Blockchain's DAO. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2020, **33**(12): 1055–1065
(王飞跃. 平行哲学与智能科学: 从莱布尼茨的 Monad 到区块链之 DAO. 模式识别与人工智能, 2020, **33**(12): 1055–1065)
- 141 Wang Fei-Yue. Parallel philosophy: Origin and goal of intelligent industries and smart economics. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, **36**(3): 308–318
(王飞跃. 平行哲学: 智能产业与智慧经济的本源及其目标. 中国科学院院刊, 2021, **36**(3): 308–318)
- 142 Wang Fei-Yue. From computational thinking to computational culture// Academic Department of the Society, China Association for Science and Technology. *Communications of the CFF*. Beijing: Science and Technology of China Press, 2007. 128–135
(王飞跃. 从计算思维到计算文化// 中国科学技术协会学会学术部. 新观点新学说学术沙龙文集7: 教育创新与创新人才培养. 北京: 中国科学技术出版社, 2007. 128–135)
- 143 Wang Fei-Yue. The culture of computational society-oriented computing quality: Computational thinking and computational culture. *Industry and Information Technology Education*, 2013, (6): 4–8
(王飞跃. 面向计算社会的计算素质培养: 计算思维与计算文化. 工业和信息化教育, 2013, (6): 4–8)
- 144 Wang F Y. The DAO to federated intelligence and decentralized autonomous federation of intelligent systems (DeFIS): From cognitive intelligence to ecological smartness. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2021, **1**(4): 1–5
- 145 Wang F Y, Ding W W, Wang X, Garibaldi J, Teng S Y, Imre R, et al. The DAO to DeSci: AI for free, fair, and responsibility sensitive sciences. *IEEE Intelligent Systems*, 2022, **37**(2): 16–22
- 146 Wang S, Ouyang L W, Yuan Y, Ni X C, Han X, Wang F Y. Blockchain-enabled smart contracts: Architecture, applications, and future trends. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **49**(11): 2266–2277
- 147 Wang F Y, Qin R, Wang X, Hu B. Metasocieties in metaverse: Metaeconomics and metamangement for metaenterprises and metacities. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, **9**(1): 2–7
- 148 Wang F Y. The engineering of intelligence: DAO to I&I, C&C, and V&V for intelligent systems. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 2021, **1**(3): 1–5
- 149 Wang F Y, Song R, Zhou R, Wang X, Chen L, Li L, et al. Verification and validation of intelligent vehicles: Objectives and efforts from China. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, **7**(2): 164–169
- 150 Li X, Ye P J, Li J J, Liu Z M, Cao L B, Wang F Y. From features engineering to scenarios engineering for trustworthy AI: I&I, C&C, and V&V. *IEEE Intelligent Systems*, 2022, **37**(4): 18–26



杨 静 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研究生. 2020 年获得北京化工大学自动化学士学位. 主要研究方向为平行制造, 社会制造, 人工智能和社会物理信息系统.

E-mail: yangjing2020@ia.ac.cn

(YANG Jing Ph.D. candidate at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her bachelor degree in automation from Beijing University of Chemical Technology in 2020. Her research interest covers parallel manufacturing, social manufacturing, artificial intelligence, and cyber-physical-social systems.)



王 晓 安徽大学人工智能学院教授. 2011 年获得大连理工大学网络工程学士学位. 2016 年获得中国科学院大学社会计算博士学位. 主要研究方向为社会网络分析, 社会交通, 动态网群组织和多智能体建模.

E-mail: xiao.wang@ahu.edu.cn

(WANG Xiao Professor at the School of Artificial Intelligence, Anhui University. She received her bachelor degree in network engineering from Dalian University of Technology in 2011, and the Ph.D. degree in social computing from the University of Chinese Academy of Sciences in 2016. Her research interest covers social network analysis, social transportation, cybermovement organizations, and multiagent modeling.)



王雨桐 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. 2021 年获得中国科学院大学控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为计算机视觉, 图像异常检测.

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

(WANG Yu-Tong Assistant professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her Ph.D. degree in control theory and control engineering from Uni-

versity of Chinese Academy of Sciences in 2021. Her research interest covers computer vision and image anomaly detection.)



刘忠民 北方自动控制技术研究所高级研究员. 2020 年获中国科学院大学管理科学与工程博士学位. 主要研究方向为智能系统和个人的培训、验证和认证, 尤其是重型智能机械和操作.

E-mail: Liuzhongminafi@163.com

(LIU Zhong-Min Senior researcher at North Automatic Control Technology Institute. He received his Ph.D. degree in management science and engineering from University of Chinese Academy of Sciences in 2020. His research interest covers training, validating, and certificating of intelligent systems and personals, especially for heavy duty smart machineries and operations.)



李小双 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. 主要研究方向为模仿学习, 深度强化学习和智能交互.

E-mail: lixiaoshuang2017@ia.ac.cn

(LI Xiao-Shuang Ph.D. at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers imitation learning, deep reinforcement learning, and intelligent interaction.)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员. 主要研究方向为智能系统, 复杂系统建模, 分析与控制. 本文通信作者.

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

(WANG Fei-Yue Professor at the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems. Corresponding author of this paper.)