

探讨 AI for Science 的影响与意义：现状与展望

王飞跃^{1,2}, 缪青海¹, 张军平³, 郑文博⁴, 丁文文⁵

(1. 中国科学院大学人工智能学院, 北京 100049; 2. 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;
3. 复旦大学计算机科学技术学院, 上海 200433; 4. 武汉理工大学计算机与人工智能学院, 湖北 武汉 430070;
5. 澳门科技大学澳门系统工程研究所, 澳门 999078)

摘要: 以 ChatGPT 为代表的新一轮人工智能技术浪潮正推动人类社会全面变革, 科学研究范式正加速转换, 一场人工智能驱动的科学研究的 (AI for Science, AI4S) 革命正在到来。分析了 AI4S 的基本概念和特点, 从数学、物理、生物、材料等角度简要综述了 AI4S 的发展现状。大力发展 AI4S 对提高国家竞争力、发展社会经济、加强技术储备都具有十分重要的意义。为更好地推动我国 AI4S 的发展, 以下两点十分关键: 一是变革当代的教学与教育, 倡导 AI for Education 和 Education for AI; 二是以 DAOs 和 DeSci 为基础建立适应“新科学研究范式”的“新组织方式”和“新科研生态”, 为 AI4S 研究提供公开、公平、公正的可持续性支持。

关键词: 人工智能驱动的科学研究的; 分布式自主科学; 分布式自治组织与运营

中图分类号: TP3-05

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202310

The DAOs to AI for Science by DeSci: the state of the art and perspective

WANG Fei-Yue^{1,2}, MIAO Qinghai¹, ZHANG Junping³, ZHENG Wenbo⁴, DING Wenwen⁵

1. School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

3. School of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

4. School of Computer Science and Artificial Intelligence, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

5. Institute of System Engineering, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

Abstract: The new wave of artificial intelligence technology represented by ChatGPT is promoting the comprehensive transformation of human society, the transformation of scientific research paradigm is accelerating, and an artificial intelligence-driven scientific research (AI for Science, AI4S) revolution is coming. The basic concepts and characteristics of AI4S were analyzed, and the development status of AI4S were briefly summarized from the perspectives of mathematics, physics, biology, and materials. Vigorously developing AI4S is of great significance to improving national competitiveness, developing social economy, and strengthening technical reserves. In order to promote the development of AI4S better, the following two points are essential: one is to change the contemporary teaching and education, and advocate AI for Education (AI4E) and Education for AI (E4AI); the other is to establish and adapt to the "new scientific research paradigm" with "new organization mode" in a "new research ecology", based on DAOs and DeSci, for open, fair and just sustainable support for AI4S.

Key words: AI for Science, decentralized science, decentralized autonomous organizations and operations

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-03-03

通信作者: 缪青海, miaoqh@ucas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62271485, No.61903363, No.U1811463); 复杂系统管理与控制国家重点实验室开放基金资助项目 (No.20220117)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62271485, No.61903363, No.U1811463), Open Project of the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems (No.20220117)

0 引言

为了贯彻落实《新一代人工智能发展规划》，科学技术部会同国家自然科学基金委员会近期启动“人工智能驱动的科学研究”(AI for Science, AI4S)专项部署工作，引起广泛关注。专项部署工作紧密结合数学、物理、化学、天文等基础学科关键问题，围绕药物研发、基因研究、生物育种、新材料研发等重点领域，借助 AI4S 的学科交叉特色，促使甚至迫使传统学科变革，加速迈向交叉化新学科大发展的时代。

本文首先分析 AI4S 的基本概念和主要特点，随后从数学、物理、生物、材料等角度简要综述 AI4S 的进展。鉴于 AI4S 对国家竞争力、社会经济、技术储备等具有十分重要的意义，推动 AI4S 快速、良性发展至关重要。为此，笔者认为民众教育和科研生态是发展 AI4S 不可忽略的问题：一是教育先行，大力倡导 AI for Education (AI4E) 和 Education for AI (E4AI)，变革当代的教学与教育模式，以适应 AI 时代的发展要求；二是要建立适应“新科学研究范式”的“新组织方式”和“新科研生态”，以分布式自治组织与运行 (decentralized autonomous organizations and operations, DAOs)^[1-2]和分布式自主科学 (decentralized science, DeSci)^[3-4]为基础打造新科研体系，为 AI4S 研究提供公开、公平、公正的强力支持。

1 AI4S 概念、特点和意义

1.1 AI4S 基本概念

AI4S 主要指应用智能科学与技术促进传统科学研究变革^[5]。AI4S 当前的特色是通过人工智能、机器学习、推理等方法处理和分析大量数据，高效发现数据之间的关联，帮助科学家克服“维数灾难”，更快、更准地理解复杂的自然现象和社会现象。AlphaGo 和 ChatGPT 之后，现有 AI 技术和成果表明，AI4S 能够帮助人类发现数据中隐藏的规律，有效地助力科学家提出新假设、获得新发现^[6]。同时，AI 也可以用于创建模拟系统和预测模型，引导科学家测试新理论、发现复杂系统的行为^[7]。

1.2 AI4S 主要特点

首先，AI4S 可以处理和分析大量的科学数据，克服“维数灾难”。牛顿正是在前人的研究和观测数据之上提出了万有引力定律，但当今海量的科学

数据远超个人能力。AI 技术可以有效地处理从实验、观测和模拟中获得的数据，并从中提取模式、趋势等重要信息，帮助科学家发现新的现象和规律，推进科学研究的进展，加速更多新时期“牛顿”的诞生。

其次，AI4S 可以提供高效的科学计算和模拟，这对于研究复杂的自然现象和复杂系统至关重要。科学家可以使用 AI 技术创建高度准确的模型，进行大规模并行模拟，使它们能够预测和测试新的假设，从而加速科研探索的迭代演进。

最后，AI4S 更加突出作为科学家的人的核心和关键作用，强化交叉学科和新文科的主导性，直面其社会和生态效应，提倡人类命运共同体，这正是以 DAOs 和 DeSci 为代表的新科学和开放运动的本源和实质诉求^[8-10]。这一点，似乎被许多注重技术的人士忽略，但必须引起我们的深入思考和积极回应。

1.3 AI4S 的重要意义

AI4S 能够提高科学研究的效率和准确性，帮助科学家在更短的时间内做出更多的发现和进展。AI4S 正加速推动科学研究的范式转移，一场改变世界格局的科学革命正在发生。

从国际竞争的角度看，AI4S 能够快速提高国家的科技实力，AI 和 science 将相互促进，为各国的科学研究提供更大的竞争优势，加速形成高科技壁垒。不能有效加速 AI4S 研究的国家，将在这场变革中掉队，最终处于十分被动的地位。从发展经济的角度看，AI4S 将加快各个学科领域的基础研究，促进行业应用，科学技术的进步势必会推动现有行业的发展，创造新的行业、新的就业机会。从技术储备的角度看，AI4S 有助于建立和完善科学技术体系，提高技术储备和创新能力。

以新材料研发为例，人工智能所带来的数据、算力和算法是“AI+材料科学”的三大技术核心。数据方面，原始数据主要来自高通量实验及计算，经过多轮数据清洗，最终获得可建模的数据，并储存于数据库中。算力方面，GPU、云计算等资源为“AI+材料科学”提供了重要的计算支撑。随着高性能计算设备及云计算等的发展，算力已逐渐不再成为制约其发展的决定性因素。算法（核心）方面，使用人工智能技术的材料研发，能够在物性预测和新材料研发过程中，基于更强的数据分析能力，同时利用知识工程技术，根据人类知识经验自动优先选择最能提供实验合成和测试所需信息的化合物，

减少材料科学家耗费在数据分析、大规模文献查阅和实验等工作上的时间。此外,机器学习已被证明可以有效加速材料的研发进程,通过机器学习获得的材料模型及机理,可用于材料发现设计。材料模型建立在足够多且质量高的数据之上,建模步骤包括选择合适的算法,从训练数据中进行训练,进而做出准确的预测。

2 AI4S 发展现状

AI4S 虽然最近才被广为关注,特别是在我国正成为焦点,但其在国际上已通过 DAOs 和 DeSci 蓬勃兴起。DAOs 针对产品开发,DeSci 针对基础研究,这两者的特色是基于智能科学与技术、区块链和智能合约的数字组织和数字治理^[11-15]。实际上, AI4S 可追溯到 AI 的创始年代,例如早期华人哲学家和数学家王浩利用原始的 IBM 计算机进行定理证明,催生了计算复杂性科学; AI 创始人纽厄尔和司马贺于 1956 年提出了“逻辑推理家(logic theorist)”程序,他们用今日看来简陋的机器,几分钟就证明了罗素和怀德海费尽十余年心血在其三卷本数学巨著《数学原理》中包含的主要数学定理。近几年来,在深度学习的大力推动下, AI4S 在数学、物理、生物、材料等领域更是取得了许多令人瞩目的重大进展^[5]。

2.1 数学领域 (AI for math)

在数学领域,求解偏微分方程是流体力学、空气动力学、交通流建模等领域的共性难题。2017 年以来,科学家尝试使用机器学习、ResNet、seq2seq 模型等技术求解偏微分方程,获得了更快更准的结果^[16]。2021 年 DeepMind 开发了基于机器学习的框架,用于引导数学家寻找新模式和证明新定理的直觉灵感。数学家和 AI 研究人员的合作带来了两项发现:一个是 Knots 理论,监督学习模型帮助找到了两种不同类型的结(knot)之间的新关系,从而证明了一个全新的定理;另一个是 Kazhdan-Lusztig 多项式的证明,这个问题已经被提出 40 年之久,最终在 AI 的帮助下得以证明。该框架验证了人工智能帮助数学家的新范式。

2.2 物理领域 (AI for physics)

在物理领域,除了实验数据采集、预处理和分析之外,人工智能方法还帮助科学家设计实验、优化参数。高能物理是最早引入人工智能辅助研究的领域。1990 年代,粒子物理学界就组织了一系列高

能与核物理人工智能研讨会,报道了使用神经网络和符号人工智能进行事件选择和微扰理论计算的成果。2014 年,人工神经网络赢得了 ATLAS 实验中识别希格斯玻色子的挑战。2015 年, CERN 成立了机器学习工作组来处理大型强子对撞机产生的海量数据。AI 方法的一些新进展,如生成式对抗网络(generative adversarial network, GAN)已被用于更快的事件和探测器模拟。最近, DeepMind 在 *Nature* 上发表了他们的工作:通过深度强化学习对托卡马克等离子体进行磁控制。2022 年报告称,物理学家使用包含多年实验收集的 4 618 个样本的数据集的神经网络,找到了质子中存在隐内魅夸克(intrinsic charm quarks),即隐性内含粲夸克的证据,这一发现可能会改变量子色动力学的教科书。

2.3 生物领域 (AI for biology)

在生物医学领域, AlphaFold 是继著名的 AlphaGo 之后人工智能领域的又一大成就。从 2016 年开始, DeepMind 通过构建人工智能系统来挑战蛋白质结构 3D 预测任务,这对于揭示蛋白质的性质至关重要。AlphaFold 基于大约 100 000 种已知蛋白质的序列和结构训练,增强了预测新蛋白质形状的能力,将预测误差缩小到原子尺度,而计算时间从数年缩减到数分钟,效率得到了显著提升。DeepMind 宣布 AlphaFold 数据库中超过 2 亿个蛋白质结构预测向世界各地的科学家提供开放访问,这将大大加速包括药物在内的多项重大研究。AlphaFold 并不是唯一可以预测蛋白质结构的人工智能系统, RoseTTAFold、ProtENN 也是 AI4S 的杰出代表,生物界正在使用像 AlphaFold 这样的系统来改进医学,推进针对疑难疾病药物的发现。

2.4 材料领域 (AI for materials)

在材料领域,人工智能改变了传统以实验和经验为主的材料研发模式。2011 年美国提出“材料基因组计划”(materials genome initiative, MGI),旨在解码材料的不同组成成分和性能的对对应关系,通过结合计算工具平台、实验工具平台和数字化数据(数据库和信息学)平台,借助高通量计算、大数据、人工智能等技术,有效整合现有的材料研究力量和设备,将高通量实验工具的效能发挥到最大,缩短材料研发周期,降低研发成本至少 50%。2016 年 *Nature* 发布了哈佛福德

学院和普渡大学的研究成果, 科研人员利用机器学习算法, 用“失败”的实验数据预测了新材料合成, 意味着机器学习将改变传统的材料发现方式。通过整合元材料 (metamaterials)、虚拟材料、计算材料, 平行材料正通过计算机建立“小材料、大模型”, 利用机器学习和平行智能技术, 根据所需要的性能预测和引导候选材料, 提高新材料的研发速度和效率, 降低研发成本, 提高安全性、可靠性和经济性。

应该说, AI4S 专项部署工作, 并不是催生新一轮风口, 因为人工智能并没有又一次进入低谷, 而是被新技术进展再次推向新的高峰。在 AI4S 方面, 除了数学、物理和生物等领域之外, 人工智能还被用于许多学科。来自 AI 和科学领域的科学家正在研究 AI4S 的前沿领域。正如我们所见, 人工智能在科学研究中的角色随着深度学习的繁荣发生了变化。早期, 人工智能方法只是作为辅助工具, 帮助分析实验数据。如今, 人工智能方法已被视为更复杂任务的关键技术, 包括定理证明、结构设计和知识发现。

3 探索 AI for Science 之 DAOs

3.1 科学突破, 教育先行

人工智能技术的快速发展, 特别是 Chat GPT^[17-20]等大模型在内容生成、艺术创作等领域的突破, 加快了社会变革。确实有一些重复性的工作可能会被取代, 这引起了不少人的担忧。然而, 正像百年前的工业革命和半世纪前的信息产业革命展示的一样, 作为群体的我们根本无须担心, 历史和现实也不许我们担心, 特别是担心也根本没有任何用途。工业革命, 机器没有取代农民, 但让许多农民成为工人; 信息革命, 计算机没有取代工人, 但让许多工人成为软件工程师; 智能革命, AI 更不会让我们失业, 而且, 就像百年前的“杰文斯悖论”表明的: 人工智能将需要更多的人工, 为我们提供更多更好的工作。当然, 为了缓解时下民众的焦虑和现实问题, 社会各界可以采取以下措施。

首先, 引导社会对人工智能的认知和理解。通过舆论宣传, 让人们认识到, 电灯取代蜡烛、汽车取代马车、电动机取代蒸汽机, 每一次技术革命都有很多行业消失, 但同时创造出更多的行业, 带来更多的机会。

其次, 投资新兴产业。人工智能中的机器学习、

深度学习等技术促进了新产业的诞生, 社会各界可以投资新兴产业, 支持小企业和初创企业, 鼓励创新和创业。这些产业需要更多的人才, 有更多的就业机会和更好的待遇。

第三, 为社会全体提供人工智能驱动的专业及相关行业的教育、科普和培训, 帮助人们获取新技能和知识, 以适应新的工作和市场需求。实际上, AI4S 的基础和关键是 AI4E 和 E4AI, 变革当代的教学与教育已成为刻不容缓的任务。

3.2 HANOI: AI for Science 之道

AI4S 的良性发展, 必须要有适应“新科学研究范式”的“新组织方式”和“新科研生态”。当前, 一些新思想和新技术的出现, 为 AI4S 范式创新带来了机遇。例如, 由 Web3、区块链及智能合约技术驱动的 DeSci 浪潮正在带来科学研究组织方式的变革^[21-22]。

随着人工智能研究进入快速迭代阶段, 人们呼吁建立新的研究机制来克服传统科学合作中的问题, 例如缺乏透明度和信任等。DeSci 致力于为科学家创建一个开放、分布、透明和安全的网络, 以共享数据、信息和研究成果, 直接采用数字化、水平化治理, 使科学家能够以更公开和公平的方式一起工作。DAOs 是 DeSci 的实现方式, 为人工智能的创新和应用提供了新的组织形式。DAOs 是一种通过代码运作, 运行在区块链网络上的数字组织。DAOs 通过智能合约进行数字化治理运维, 这意味着 DAOs 的成员拥有决策和执行行动的投票权, 使其成为一个透明和公正的系统。

为了应对上述挑战并利用新机遇, 学术界基于 DAOs 已经完成了一系列工作, 笔者也提出了人在环路的交互智能元宇宙框架^[23], 作为新时期助力 AI4S 研究的基础。目前, DeSci 已成为世界范围的时代潮流, 必须引起关注。为此, 笔者提出 HANOI 框架, 这是一个包含人类 (human)、人工世界 (artificial world)、自然世界 (natural world) 的有组织化的智能 (organizational intelligence) 研究范式, 以 DAOs 和 DeSci 为基础, 同时为 AI4S 和 Science for AI (S4AI) 的研究提供公开、公平、公正的可持续性支持^[24]。

4 结束语

尽管人们对 AlphaGo、AlphaFold、ChatGPT 这样的进步感到兴奋, 但在 AI4S 成为流行范例之前,

我们还有很长的路要走。而且,教育必须先行,否则将无法持续。首先,人工智能与各个科学学科之间的知识差距是显而易见的,研究人员必须有一个学习曲线来学习另一边的技能。而且,人工智能研究人员学习科学中特定领域知识的学习曲线或许更陡峭,因为建立一个全新背景的知识体系更加困难。相反,在大多数 AI4S 案例中,最受欢迎的工具是深度学习模型,它相对容易掌握。其次,目前还没有一个将人工智能与某一科学领域相结合的通用框架。然而,在 AI 领域,工具和平台已经很成熟并且易于使用,特别是 ChatGPT 发布之后,AI 的大众化前所未有的。当然,在科学领域,也有许多在特定领域里被广泛使用的成熟软件。无论如何,我们必须以“小问题、大模型”的理念,以“小任务、大设计”的原则,通过 AI 开发并利用更多像 AlphaFold 和 ChatGPT 这样的智能系统来辅助科学研究。我们相信,弥合差距的各种各样的通用平台将在不久的将来出现,使 AI4S 成为科研的主流,使 S4AI 成为教育的主体。

2014 年,在青岛智能产业技术研究院成立之初,王飞跃^[25]提出以平行科学作为可持续智能产业和智慧社会的基础与保障,利用数字人理论科学家和机器人工程师构建平行物理、平行化学、平行材料、平行生物、平行医学、平行经济、平行艺术、平行哲学等,相信随着 AlphaGo 和 ChatGPT 等智能技术的进一步深入和普及,特别是 DeSci 和 AI4S 的发展壮大,平行科学将成为新的科学范式。

参考文献:

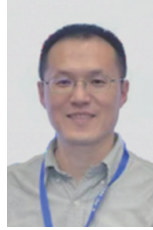
- [1] WANG S, DING W W, LI J J, et al. Decentralized autonomous organizations: concept, model, and applications[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(5): 870-878.
- [2] 丁文文, 王帅, 李娟娟, 等. 去中心化自治组织: 发展现状、分析框架与未来趋势[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 202-213.
DING W W, WANG S, LI J J, et al. Decentralized autonomous organizations: development status, analysis framework and future trend[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 202-213.
- [3] HAMBURG S. Call to join the decentralized science movement[J]. Nature, 2021, 600(7888): 221.
- [4] WANG F Y, DING W W, WANG X, et al. The DAOS to DeSci: AI for free, fair, and responsibility sensitive sciences[J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(2): 16-22.
- [5] MIAO Q H, HUANG M, LV Y S, et al. Parallel learning between science for AI and AI for science: a brief overview and perspective[C]//Proceedings of 2022 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 171-175.
- [6] WANG F Y, MIAO Q H, LI X, et al. What does ChatGPT say: the DAOS from algorithmic intelligence to linguistic intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 575-579.
- [7] WANG F Y, YANG J, WANG X X, et al. Chat with ChatGPT on industry 5.0: learning and decision-making for intelligent industries[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 831-834.
- [8] 王飞跃. SciTS: 21 世纪科技合作的灯塔[J]. 科技导报, 2011, 29(12): 81.
WANG F Y. SciTS: a beacon of scientific and technological cooperation in the 21st century? [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(12): 81.
- [9] WANG F Y. From AI to SciTS: team science and research intelligence[J]. IEEE Intelligent Systems, 2011, 26(3): 2-4.
- [10] DING W W, HOU J C, LI J J, et al. DeSci based on Web3 and DAOS: a comprehensive overview and reference model[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2022, 9(5): 1563-1573.
- [11] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
YUAN Y, WANG F Y. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [12] 袁勇, 王飞跃. 区块链理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
YUAN Y, WANG F Y. Blockchain theory and method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- [13] 袁勇, 王飞跃. 区块链+智能制造: 技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
YUAN Y, WANG F Y. Blockchain + intelligent manufacturing: techniques and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [14] 欧阳丽炜, 王帅, 袁勇, 等. 智能合约: 架构及进展[J]. 自动化学报, 2019, 45(3): 445-457.
OUYANG L W, WANG S, YUAN Y, et al. Smart contracts: architecture and research progresses[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(3): 445-457.
- [15] WANG S, OUYANG L W, YUAN Y, et al. Blockchain-enabled smart contracts: architecture, applications, and future trends[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(11): 2266-2277.
- [16] 卢经纬, 程相, 王飞跃. 求解微分方程的人工智能与深度学习方法: 现状与展望[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4(4): 461-476.
LU J W, CHENG X, WANG F Y. Artificial intelligence and deep learning methods for solving differential equations: present situation and prospect[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2022, 4(4): 461-476.
- [17] ZHOU J, KE P, QIU X P, et al. ChatGPT: potential, prospects, and limitations[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, accepted.
- [18] DU H P, TENG S Y, CHEN H, et al. Chat with ChatGPT on intelligent vehicles: an IEEE TIV perspective[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, accepted.

- [19] ZHANG J P, PU J, XUE J R, et al. HiVeGPT: human-machine-augmented intelligent vehicles with generative pre-trained transformer[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, accepted.
- [20] GAO Y B, TONG W, WU E Q, et al. Chat with ChatGPT on interactive engines for intelligent driving[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, accepted.
- [21] WANG F Y. The metaverse of mind: perspectives on DeSci for DeEco and DeSoc[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2043-2046.
- [22] DING W W, LI J J, QIN R, et al. A new architecture and mechanism for decentralized science metamarkets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023.
- [23] WANG F Y. Parallel intelligence in metaverses: welcome to Hanoi![J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(1): 16-20.
- [24] MIAO Q H, ZHENG W B, LV Y S, et al. DAOS to HANOI via DeSci: AI paradigm shifts from AlphaGo to ChatGPT[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 877-897.
- [25] 王飞跃. 平行科学: 可持续智能产业和智慧社会的基础与保障[R]. 2014.
- WANG F Y. Parallel sciences for sustainable intelligent industries and smart societies: foundations and perspectives[R]. 2014.

[作者简介]



王飞跃 (1961—)，男，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任，主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。



缪青海 (1979—)，男，中国科学院大学人工智能学院副教授，主要研究方向为智能系统、平行智能、机器学习等。



张军平 (1970—)，男，复旦大学计算机科学技术学院教授，主要研究方向为人工智能、计算机视觉、图像处理。



郑文博 (1995—)，男，武汉理工大学计算机与人工智能学院副研究员，主要研究方向为计算机视觉与机器学习。



丁文文 (1990—)，女，澳门科技大学澳门系统工程研究所博士生，研究助理，主要研究方向为 DAOS、DeSci、平行智能与平行管理。