DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.01.008

群体智能及产业集群发展战略研究

吴文峻[1*]，郑志明[1]，王怀民[2]，唐绍婷[1]，王涛[2]

（1. 北京航空航天大学人工智能研究院，北京 100191；2. 国防科技大学计算机学院，长沙 410073）

摘要：群体智能是新一代人工智能的重要组成部分，在激发汇聚创新力量、耦合集成大规模智能系统方面发挥决定性作用，对于促进人工智能与传统产业的深度融合、推动国民经济持续发展都具有重大意义。本文凝练了群体智能的技术体系，总结了其主要的技术方向，包括：多智能体系统与优化决策、无人集群系统、开源群智软件和群智联邦学习等；论述了这些核心技术面向应用场景，形成感知–认知–决策–行动的智能化回路，以分布式数智化模式支撑平台经济，重塑产业发展和数字经济产业生态。根据上述技术体系的赋能对象和应用模式，深入分析了与群体智能相关的核心产业，特别是软件服务产业、智慧城市产业群、基于无人集群的智慧农业和智慧港口产业等对群体智能技术的不同需求和赋能路径。最后，提出了群体智能赋能相关产业的发展建议：持续推动群智开源社区的建设，打造人工智能科技创新生态系统的智力内核，加速无人集群系统的国产化替代、集成攻关和推广应用。

关键词：群体智能；开源软件；无人集群；联邦学习；平台经济

中图分类号：TP18　　**文献标识码：**A

Development Strategy of Collective Intelligence and Its Industrial Clusters

Wu Wenjun[1*], Zheng Zhiming[1], Wang Huaimin[2], Tang Shaoting[1], Wang Tao[2]

(1. Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. College of Computer Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Collective intelligence is an important component of the new generation of artificial intelligence (AI). It plays a decisive role in stimulating and converging innovative forces as well as coupling and integrating large-scale intelligent systems. It is of great significance for promoting deep integration of AI and traditional industries and enabling the sustainable development of the national economy. This study summarizes the overall technical framework of collective intelligence and its major research areas, including: multi-agent systems and optimal decision-making, unmanned swarm systems, open source collective intelligence software, and federated learning. Moreover, it analyzes how these core technologies can be applied in industrial scenarios, in order to establish intelligent processing loops of perception–cognition–decision–action, to support platform economy with distributed intelligence, and to reshape industrial development and digital economy ecosystems. Based on the subjects and application modes of the technical framework, this study analyzes the core industries related to collective intelligence, particularly the software service industry, the smart city industrial cluster, and the intelligent agriculture and port industries based on unmanned swarm systems, by highlighting their significant requirements and empowerment approaches for collective intelligence technologies. Furthermore, this study presents suggestions on how to utilize collective intelligence technologies to foster development of rated industries. It is suggested that we

收稿日期：2024-01-30；**修回日期：**2024-02-26

通讯作者：*吴文峻，北京航空航天大学人工智能研究院教授，主要研究方向为群体智能；E-mail: wwj09315@buaa.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“新一代人工智能及产业集群发展战略研究”(2022-PP-07)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

should continuously promote the establishment of open source communities of collective intelligence, enhance the intellectual core of the AI technological innovation ecosystem, and accelerate the domestic substitute of unmanned swarm systems through integrated system research.

Keywords: collective intelligence; open source software; unmanned swarm; federated learning; platform economy

一、前言

以互联网和移动通信为纽带，人类群体和机器群体正在实现广泛、深度的互联与协同，使得以激发汇聚多智能体为主要形式的群体智能（简称群智）日益发挥重要作用。多个智能体不断耦合关联，形成群体化的智能系统，涌现出人–机–物融合的复杂智能系统新形态，如大规模智慧城市的智能管理系统、开放复杂环境下的社会智能治理系统、海量的智慧金融市场管理和优化系统、宏观社会经济智能决策系统、超大规模工业互联网和产业链的智能管理系统等。社会、经济、城市、工业等领域的复杂巨系统的智能管理、优化调控、持续发展，是关系社会治理和国民经济进步的重大科学工程问题。

群智是指在特定的组织结构和激励机制驱动下，通过吸引、汇聚和管理大规模智能体（包括人作为智能体和智能机器人作为智能体），以竞争和合作等多种自主协同方式来共同应对挑战性任务时，特别是开放环境下的复杂系统决策任务时，涌现出来的超越个体智力的智能形态[1]。通过这个定义可以看出，群智的形态是多种多样的，根据群智系统应用的领域，它既涉及到人类的社会群体，又涵盖异构的人造机器智能群体，是人–机–物融合的复杂智能系统。我国的《新一代人工智能发展规划》把群智列为新一代人工智能理论和技术体系的重要组成部分。因此，面向国家科技创新的重大需求，发展群智的关键技术和核心产业具有重要战略意义。

本文首先概括群智技术的发展趋势，重点阐述群智的技术体系，简要介绍群智技术核心领域的主要研究对象及其相关关系，探讨群智技术的未来发展趋势。其次，深入讨论群智支撑平台经济的核心模式，进而论述群智的核心产业集群，包括：软件服务业、智慧城市产业、智慧农业和智慧港口等，分析群智技术在这些产业领域的典型应用模式。最后，提出群体智能技术赋能相关产业的发展建议。

二、群体智能的技术体系和发展趋势

当前，群智技术的发展趋势是基于系统主义的理论路线，吸纳和借鉴新一代人工智能的最新研究成果，克服了经典的多智能体和仿生群智方法所存在的“群而不智”的局限，着重解决复杂开放环境下如何有机协同异构异质的众多智能体，并实现可持续的群智涌现问题[2]。本文特别关注群智的四个关键技术方向：多智能体系统与优化决策技术、无人集群系统技术、群智软件技术和群智联邦学习技术（见图1）。其中，多智能体系统与优化决策技术是群智技术体系的理论基础，而其他三个核心技术则是针对不同形态的群智领域而发展起来的关键技术：无人集群系统技术侧重研究具身化的机器群体智能，群智软件技术侧重研究以人类群体为主的协作式社会群体智能，群智联邦学习技术重点研究以隐私保护为核心、以模型参数共享为主要任务的分布式多智能体系统。

上述四大技术群是支撑群体智能系统构造的基石，无论是偏重人类群智的软件开发，还是侧重机器群智的无人集群作业，都会采用这些技术要素，构造面向具体群智任务场景的感知–认知–决策的自适应回路，以支持软件服务、智慧城市、智慧农业和智慧码头等群智核心产业。

（一）群体智能技术群

1. 多智能体系统与优化决策技术

群智的基础理论重点关注多智能体系统的建模，并使之在复杂环境中通过协同和竞争等各种模式，实现系统的最优决策。多智能体系统是关于自然或人工群智系统的计算模型，刻画自主智能体相互协作与竞争的基本原理，以集中或者分布式组织方式完成复杂的任务。围绕不同多智能体的组织模式和设计方法，可以分为：面向多智能体的运筹学、仿生群智优化方法、多智能体强化学习（MARL）等。

运筹学和优化方法侧重以集中规划方式，解算多目标约束条件下的多智能体系统优化目标。面向

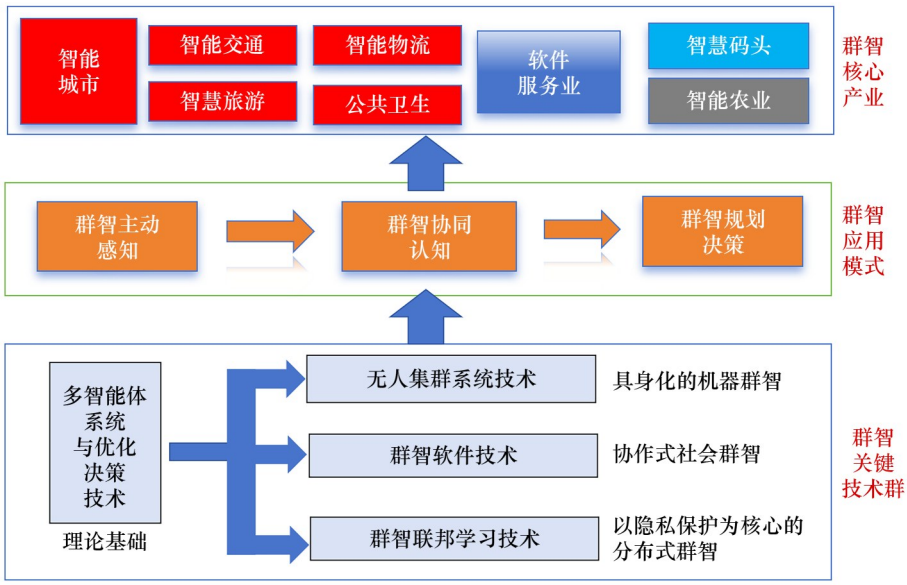

图1 群体智能技术体系与核心产业

合作任务或者博弈任务的目标，优化器需要计算多智能体系统的角色设定、路径规划、任务分配和运动协调等问题，同时考虑环境条件、执行成本等约束条件[3]。这类问题的计算复杂性往往是“NP 难”问题，所以针对大规模多智能体系统的优化问题，需要采用各种近似求解方法，来加速计算过程。

仿生群智优化方法则着重从生物群智观察中提炼其动力学规律，设计仿生的控制方程，实现多智能体的优化。自然界中大量个体聚集时往往能够形成协调、有序的场景，如飞行的鸽群、巡游的鱼群、觅食的蚂蚁、采蜜的蜜蜂以及微小的细菌种群等。从物理学角度来看，它们都是偏离平衡态的活性物质的自组织行为，通过对这些自然界中生物群体的观察[4]，就可以构建类似 Reynolds[5]和 Vicsek 群体动力学模型[6]，指导我们对人工群智系统进行设计。

MARL 是群智的重要研究领域[7]，来源于多智能系统的长期研究，旨在解决多个具有自主决策能力的智能体在环境中交互学习并完成最优决策的问题。MARL 技术结合博弈论、认知学、多智能体系统的基本原理，以探寻多智能体博弈均衡为目标，催生出一系列新型群智技术。目前，MARL 在游戏博弈、无人集群、智能电网、智能制造、智能交通等许多领域都得到了广泛应用。

2. 无人集群系统技术

无人集群系统由众多具有一定自主 / 协同能力的受控智能体（单个运动体）按一定的协议构成，如微纳卫星群、无人机蜂群、无人搬运车（AGV）系统等[8]。对于无人机、无人车、无人艇等实际集群系统而言，以群智涌现能力为核心的高效能协同体系，能够为侦察、探测、搜救、测绘等典型任务带来非线性效能增长和颠覆性应用突破，正在成为国家各个战略领域中不容忽视的力量。在民用领域，无人机、无人车等无人集群系统在仓储物流、资源监控、环境保护、灾难响应、农林作业、森林防火、安防巡逻等领域中展现出强大的应用潜力。

无人集群智能协作模式是模仿生物和人类社会的激发汇聚模式，通过激发汇聚单个无人系统的机器智能而涌现群体化的机器智能。传统上，无人集群系统往往参考生物群体的运动机理，模仿生物动力学方程，构建机器智能体的交互方式和行为规则。这种经典的群智设计模式相对简单而可靠，使得无人集群在场景相对固定、任务相对单一的情况下，可以高效地协同工作。但是在面对复杂多变的环境、多样性任务、异构化群体组成等情况时，这一设计模式就会显得自主性不高、适应性不够。为此，需要吸收合作式多智能体强化学习的新思路和新方法，设计无人集群系统的分布式协同体系与框架，实现面向多样性协同任务的群智高效精准涌现。

无人集群系统群智的涌现不仅需要智能算法，而且依赖于链路层、信息层、决策层、控制层的软硬件一体化技术。为此，需要基于通用化、开放式的完整无人集群软硬件技术栈，来集成相关群智算法

和技术部件，以实现群体化的感知–认知–决策–行动的控制环路。一方面，不同类型无人集群机器智能体的形状尺寸和运动功能虽然千差万别，但是它们本质上都属于智能化的嵌入式系统，需要遵循嵌入式系统的设计方法，集成传感器、伺服器、嵌入式智能模型等，进行综合性的设计与验证；另一方面，面向多样化的应用场景，需要基于云–边–端一体自主集群架构来设计、验证、部署和维护无人集群系统。

3. 群智软件技术

互联网、云计算和大数据的发展为大规模人群的信息共享与交互提供了崭新的技术手段，依托互联网的社会群体活动已达到前所未有的规模，并促使社会群智研究蓬勃发展。例如，维基百科（Wikipedia）借助大众协作编辑形成了世界最大的网络百科全书；智能地图通过时空数据众包共享实现了实时精准的导航服务；开源软件通过协作开发创造了以Linux为代表的软件产品，并成功形成了一种新的软件技术创新模式。

开源作为互联网上的一类特殊大规模群体创作模式，以互联网开源社区为协作环境，将软件源代码和开发过程等对外开放并允许大众自由参与、修改和传播，使得关联复杂、多样化的参与群体可以自由地参与软件的创作与生产活动，涌现出高度自治的群智[9]，极大地加速了软件技术的创新效率。开源群智是以人类智能为中心，机器智能为辅助的群智形态，人类智能和机器智能呈现相互协作、迭代演进的关系，正在形成软件开发的新范式——群智范式[10]。这一范式包含两个核心机制：群智激励机制和群智汇聚机制。

群智激励机制旨在推动大规模软件开发者群体积极参与软件开发任务和持续贡献各类软件项目要素。著名的开源社区Linux、Apache等设定了不同的参与者角色，对不同角色的参与者赋予不同的级别和权限，如提交缺陷、提交代码、合并代码、发布软件等，从而激励参与者为获得更高等级的参与权和决策权积极贡献力量。

群智汇聚机制则针对开源软件强组织与弱组织相结合的“小核心–大外围”组织模式，重点解决有效评估外围开发者贡献质量和持续集成其软件要素的问题。为提升群智汇聚效率和质量，研究者围绕开发者能力分析评估、群智贡献审阅者推荐等开展深入研究，为群智任务分配、质量检测和要素集成等提供智能化的辅助工具和手段。

4. 群智联邦学习技术

群智技术已经在多个领域取得了初步成果，然而在更多的真实应用中，由于“数据孤岛”问题的存在，群智面临数据不足、难以落地的困境。为了解决这个问题，联邦学习技术被提出[11]。其本质是打破传统机器学习原有的“计算不动数据动”的计算模式，即各参与方直接共享数据给中心平台进行计算，从而构建出的新模式。

与开源群智强调开放和共享不同，联邦学习以个人隐私保护为核心。由联邦学习构成的智能系统本质是一种分布式合作多智能体系统，系统合作的核心目标是提升参与者所需要的机器学习性能。同时，为了实现隐私保护，参与者选择共享私有模型参数，而不是私有数据。每个参与者一般都具有自主决策权力，能够自主决定是否留在联邦系统之中，以及共享多少数据或模型参数。

目前，联邦学习按照数据划分方式，主要可分为横向联邦学习、纵向联邦学习和联邦迁移学习三种[12]。在横向联邦学习和纵向联邦学习中，用户和特征至少有一个是有着较大重叠的，这让不同的参与方通过协作扩展数据规模开展模型训练成为可能。但很多时候，多方的数据难以满足上述条件，联邦迁移学习则可为其提供联合学习的可能。联邦迁移学习场景一般面临数据分布差异大、数据规模差异大、数据标签少等问题，这些问题适合使用迁移学习来解决。

联邦学习技术包括激励和隐私保护两个核心机制。像其他群智系统一样，激励机制也是联邦学习的核心要素。联邦学习需要参与的每个智能体提供计算资源、私有数据、模型参数等，而这个过程中参与者会权衡利弊，综合考虑自己的成本、安全风险和收益，自主决定是否参与联邦学习和贡献量。因此，激励机制发挥着激发智能体持续参与这一协同学习任务动力的重要作用，促使它们不断共享各自的资源和高质量数据，以便能够实现整体模型性能的提升。

隐私保护则是联邦学习的另一个核心要素，旨在从安全多方计算和差分隐私保护两个方面来确保参与者的数据隐私。安全多方计算中的同态加密和其他加密技术确保参与者可以加密它们之间的通信

消息，处理加密数据，并在接收时解密输出并获得结果。差分隐私保护则在共享的数据和模型参数中引入随机扰动噪声，保障私有数据的统计隐私性，防止攻击者通过推理攻击等方式窃取私有模型数据。

（二）群体智能技术的发展方向和演进趋势

在生成式人工智能蓬勃发展的时代背景下，特别是各类基础大模型的兴起，给群智技术的演进注入了全新的动能，呈现出“由专到通、由通到广”的发展态势。当前以专用型的多智能体系统为主要形态的群智，会加速向更加通用化、更具认知协作能力的社会群智系统演进。

1. 基于通用认知智能体的社会群智系统

近年来，语言大模型取得重大进展，涌现了面向通用化、多样性任务的认知能力，基于大模型的认知智能体成为当前研究的热点[13]。DeepMind 公司利用模仿学习方式训练了单个智能体的 Decision Transformer 大模型 Gato [14]，使其具备了多种游戏和机器人操作功能。未来，如何使基础大模型和多智能体强化学习方法更好地结合起来，使多智能体具有类人认知能力，更自如地面对各种各样的环境、多变的任务，涌现类人的社会化群体智能，无疑是群智领域需要探索的重要方向。

2. 具身智能赋能的无人集群系统

未来，无人集群系统仍有巨大的发展空间。当前融合多模态大模型和决策智能的具身智能成为研究热点[15]，具有大幅提升机器人自主作业能力的潜力。具身智能的技术架构也可以扩展到无人集群系统的研究方向。基于多模态基础模型，提升无人集群系统的环境感知、认知能力，实现开放环境下的协同感知，识别未见动态目标类型，完成从数据感知到态势认知的转变。同时，基于语言的大模型可支撑无人集群系统的高层作业规划、任务分配与行动协作。基于上述的核心技术突破，未来有望研发多尺度、多类型、超大规模的各类新型无人集群系统，实现无人集群与元宇宙和数字孪生技术的深度结合。

3. 社会智能增强的开源群智软件生态

开源群体智能是以人类智能为中心、机器智能为辅助的群智形态。近年来，基于大模型的智能编程技术进展给开源群智的人机协同带来了全新的发展机遇。目前 OpenAI 公司和微软公司推出的编程大模型 Codex 和智能编程工具 Copilot [16]，为开放者提供了自动代码生成、代码理解与文档生成、代码调试与查错等服务，已经成为广大开发者的有力助手。未来将会出现更多的软件开发智能助理，形成开源社区的智能助手群体，深入融合到软件开发的需求分析、架构设计、测试验证、部署运维等诸多环节，极大提升开源群智软件的创意水平和开放效率。为此，需要面向全新形态的开源社群，研究类人社会群智的组织架构、激励机制、协同范式，研究人机社会群智的互补学习、交互协同与持续演进机制，构建人–机异构智能体协同演进的复杂群智开源生态系统。

4. 分布式群智联邦学习与大小模型生态

目前，联邦学习系统主要还是以一个或多个云服务器为中心，由连接边和端的各类计算设备而形成，以中小规模的应用场景为主。大规模、对等化的群智学习系统[17]，即集成云–边–端计算、区块链和对等计算等技术，形成一个对等分布式机器学习网络，不再依赖中心节点，而是由每个智能体独立完成模型更新和参数交换步骤。这一模式无疑为未来的模型生态构建提供了新的思路。可以预见，在大小模型分布共存、协同演进的趋势下，联邦学习将发挥可信参数共享、分布协同训练与微调、高效可信检索推理的纽带作用，并与跨域数据可信流通和交易技术紧密结合，形成覆盖高价值大数据语料库、超大规模基座模型、大规模领域模型组、海量中小微模型群体的可持续和自组织的模型智能体生态系统。

三、群体智能技术支撑数字平台经济发展

群智的应用模式是面向各类复杂巨系统的应用场景，基于群智关键技术构建人–机–物的群智互联体系，形成感知–认知–决策–行动的完整智能化回路，以分布式数智化模式重塑产业发展模型和数字经济产业生态。

当前，我国进入数字经济时代，数字经济通过数字的产业化、产业的数字化直接或间接利用数据来引导资源发挥作用，推动生产力发展。数字经济的发展催生了平台经济[18]。众所周知，在数字经济时代，平台经济模式对产业发展起到了至关重要的作用。它通过群体化和智能化的信息平台，实现资

源共享、协同互动、价值共创，构建起一个联动交互的经济新形态，彻底改变了各类要素生产及创造价值的方式，重塑了资源调配和经济组织模式。由此可见，平台经济本质上是经济领域中群智的集中体现，平台吸引了大量的经营和消费主体，支撑了各类主体之间的供需智能匹配和价值联结，涌现出有机互补、蓬勃增长的新型市场。面向这样的经济市场系统，群智的四大核心技术正在发挥关键性的支撑作用。

第一，多智能体系统与决策优化技术是支撑平台经济的核心技术要素。复杂开放的市场系统具有高度的动态性和群体性，需要及时有效地感知和预测消费者群体的需求，对服务经营群体进行相应的激励优化、动态调配和博弈决策，实现最优的资源配置和服务匹配。平台综合利用多智能体系统与决策优化和群智联邦学习技术，构建群智感知–认知–决策回路，突破传统以人工为主的市场优化局限，确保数字经济市场的高效有序运行。

第二，无人集群系统技术促进数字经济和实体经济的深度融合。数字经济不单是运行在信息空间里，还与物理空间中的实体经济紧密融合。实体经济如工业、农业、运输业等，正在从过去的机械化，走向数字化和智能化。人工智能、数字孪生和万物互联给实体经济的数智化转型提供了巨大的推动作用。其中，无人集群技术就是把以数字形态为主的群智模型与机器人技术结合，形成可以在物理环境作业的具身化群智，对于大规模的工业制造、物流仓储、港口运输、农场作业、矿山开采等场景都有重要的支撑作用。群体化的机器智能将可以胜任更多复杂的作业任务，不但能使现有的经济活动提质增效，而且未来还有助于缓解从事艰苦工作的劳动力短缺问题。

第三，群智软件技术为平台经济提供基础设施和应用服务。平台经济需要依赖可靠的软件系统才能稳定地运行，平台的业务服务和管理需要依赖智能的软件工具和应用程序才能得以实现。开源群智社区已经成为软件创新的源泉：一方面，开源社区汇聚和共享了大规模、高质量的开源软件，为企业服务平台的高效构建提供了可复用的软件；另一方面，群智开源模式加速人类群体创新能力的激发汇聚，为平台经济软件系统的设计开发、演化维护提供开发模式和工具服务支撑。

第四，群智联邦学习技术为平台经济提供隐私保护和可信解决方案。数字经济平台需要保护各类主体的隐私，规范市场行为，实现数字资产的精准确权和可信交易。群智联邦学习结合区块链相关技术，可以在有效保护生产者、经营者和消费者群体的个人隐私情况下，仍然可以提取数据的价值，联合训练私有模型和联邦共有模型，支撑智能化的交易管理和决策。同时，基于智能合约机制，更好地监管、保护各市场主体的权利，避免潜在的欺诈交易风险，实现高度可信的公平交易和资源优化配置。

四、群体智能的核心产业集群分析

本文对群体智能所涉及的三个产业群形态：软件服务业、智慧城市产业群、基于无人集群的智慧农业和智慧港口等进行深入的全景式分析。

（一）软件服务业

开源成为20多年来最具活力的软件科技与产业创新模式，在软件开发、芯片设计等领域都取得了巨大成功，对推动我国软件科技与产业发展具有重要意义。

国家出台了一系列政策规划推动国内群智开源不断发展。《“十四五”数字经济发展规划》[19]提出支持具有自主核心技术的开源社区、开源平台、开源项目发展，推动创新资源共建共享，促进创新模式开放化演进；工业和信息化部印发的《“十四五”软件和信息技术服务业发展规划》[20]，系统布局“十四五”开源生态发展。在国家主管部门的系统布局和政策引导下，随着移动互联网、云计算、人工智能的蓬勃发展，我国开始涌现出大量开源项目的开发者，形成了一批代表性的国内开源社区。典型代表包括中国计算机学会GitLink社区、红山开源社区、开源中国社区、木兰开源社区、GitCode、OpenI启智开源社区等。

我国群智开源从参与融入走向蓄势引领。《2022中国开源贡献度报告》统计[21]，我国拥有占全球30%的大规模开发者群体，开源增长空间和潜力巨大。报告选取Apache软件基金会、云原生（CNCF）基金会、Linux基金会、GitHub、中国专业IT社区（CSDN）、码云（Gitee）的头部项目并以两年作为统计期，全球贡献者（以邮箱统计）共计213 982人，

贡献者地区为中国的用户人数为 10 691 人，预计中国开发者占总贡献者的数量约为9.5%。基于国内主流的技术社区及论坛的注册用户数观察中国开发者的整体增长趋势时发现，中国开发者社区CSDN拥有的注册账号数量为8700万，而注册用户数量在排重以后是4200万，相较2021年新增了600万用户。根据开源社区Gitee统计，2022年Gitee新增了200万的用户，总用户数达到1000万，平台仓库数量达到2500万，新增仓库数量为480万，总用户数达到1000万。

开源生态的兴起对我国信息产业，特别是软件服务业已经发挥了积极的促进作用。调查显示，2020年我国使用开源技术的企业占比为88.2%，比2018年增长了6.8%。在重点行业开源使用率方面，《2020年开源安全和风险分析报告》显示[22]，物联网行业89%的代码库中包含开源代码；生产制造和网络安全领域开源代码占比均为84%；移动应用软件、教育技术、医药健康以及营销技术行业开源代码占比均为82%。

我国开源软件与国际开源生态相比，项目活跃度和影响力仍然存在明显差距，需要持续提升。《2023中国开源发展蓝皮书》[23]显示，我国大型企业开源的项目体量及活跃度总量与美国大型企业相比，还有不小的差距。全球排名第一的企业为微软公司，活跃项目数为7629个，年度活跃度为82万次，项目平均活跃度为108次；我国排名第一的企业为阿里巴巴集团控股有限公司，活跃开源项目数为2635个，年度活跃度为10.3万次，项目平均活跃度为39次。另外，《2022中国开源贡献度报告》[21]显示，在国际开源Top50项目中，我国只有ant-design和vue-element-admin两个项目上榜，排名为17和26，均为前端项目，这表明我国的主流开源项目仍然较少，在开源根技术和核心开发工具方面仍很薄弱。

群智软件技术对于支撑软件产业未来发展，特别是解决大规模复杂智能软件开发创新的难点、痛点问题有重要作用，大规模开发者群体及复杂软件多元要素的跨域感知–行为认知–决策规划等将有力推动软件系统高效研发创新与软件产业高质量发展。

1. 软件开发要素的跨域群智感知

大规模复杂软件系统的研发通常涉及到遍及全球的开发者、用户等不同参与者交互以及项目内和项目间多元要素的关联。大规模跨域群智感知技术通过广泛汇聚各类要素的信息，分析和挖掘这些信息的内在关联并建立不同要素间的联接，实现跨分支、跨项目、跨社区的开发者与项目动态感知，可以有力支撑围绕软件系统研发的群体高效协作和群智协同创新。

2. 软件开发群体的多维度群智认知

“人”是软件系统构建演化的驱动要素，对软件开发群体的全面认知是把控软件系统构建演化的关键。以软件开发要素的跨域关联为基础，利用软件开发者群体的多维度群智认知技术实现对参与者群体能力、状态及软件系统研发任务、态势等的精准把控，帮助社群的管理者建立开发者和项目的数字画像，判断项目开发的瓶颈薄弱环节，识别开发社群的积极推动力量，预测项目开发的里程碑目标是否能够实现，预判软件制品可能存在的质量问题等。

3. 软件开发过程的动态决策规划

大规模软件开发涉及各类要素的复杂交互协作，对开发过程的有效组织是实现软件开发目标的关键。群智软件技术支撑自适应的动态激发汇聚模式，根据项目开发热点和进度要求，动态设置激励机制，激发开发者提出更多样性的软件创意思路，更积极地承担优先级高的代码设计更新与缺陷修复等任务；同时以智能化开发工具为依托，规划开发者软件成果的汇聚过程，实现更为优化的贡献审阅者推荐、集成任务分配等功能，加速开源软件的汇聚，提升软件制品的质量。

（二）智慧城市产业群

智慧城市与前面提到的数字平台经济的发展息息相关。新型智慧城市需要重点发展数字经济，创造新的平台经济体系，从而实现数字经济产业的可持续发展与精准治理。本文重点分析平台经济的典型代表——共享经济产业。共享经济将社会中的资产和劳动力等闲置资源有效地汇聚起来，实现消费主体与资源提供主体的价值对接和协同共享，实现共享出行、共享住宿、共享物流等创新商业形态[24]。本质上，共享经济是以数字市场为形态的群智。它一方面汇聚供给方决策主体的闲置资源来提供服务，并使之获取回报；另一方面感知消费方主体的需求，分享调配所汇聚的资源，通过服务–消

费的智能匹配来创造商业价值。

这种群智式的新业态，已经在交通出行、智慧物流、共信金融等方面发挥了重要作用。在交通领域，群智可使大型城市群内居民的平均通勤时间减少20%~30%，城市群内部各城市间运力提高30%~50%，为区域经济一体化提供出行保障；在物流领域，可减少超过万亿元规模的社会物流成本；在金融领域，可支撑构造多场景超大规模的高效金融清/结算与信用链体系。

面向智慧城市中共享经济和社会治理系统，群智核心技术与产业应用场景结合具有明显的共性模式，即以群智感知–预测分析–规划决策的模式，形成复杂巨系统的群智认知决策网络（见图2）。

城市规模的群智感知。现代的智慧城市系统具备万物互联的物联网基础设施，可以从人们的日常生产生活中采集海量多源、大范围时空关联的数据。群智感知方法赋能共享经济平台把握市场的脉动，提供更多的分布式智能感知手段，激励人们主动上报真实的交易和行为数据；同时建立智能体的精准分类画像，刻画每个参与个体的行为特征。为了隐私保护的需要，群智感知方法还要借助联邦学习和数据加密的方法，实现可信的分布式数据共享。

面向城市复杂系统态势的群智预测分析，在时空耦合、高动态的城市感知数据基础上，需要对平台经济系统态势进行准确的分析和预判。城市是由大量智能个体组成的复杂系统，系统中的个体通过交互不断改变自身状态，使得群体涌现出多样性的交互模式和演化规律。多智能体建模技术可以有效地支撑对这类复杂系统的预测，利用异质个体的时序特征推断群体的交互图，结合历史轨迹来预测群体行为的变化趋势，分析其演化规律。

面向城市生态和运行的群智决策规划。平台经济系统的态势分析预测为后续的规划调控决策提供了依据。群智的优化决策技术提供具有理性决策能力的智能体，辅助市场的经营主体根据平台市场的供需动态变化，完成供需之间的最优匹配和任务调度，从而保障整个生态的高效稳定运行。

本文选取智慧城市中的智慧交通、公共卫生和应急物流三个典型案例，来具体地论述群智技术的赋能作用。

1. 智慧交通领域

智慧交通领域共享出行已经成为重要的产业，截至2022年年底，全国共有298家网约车平台取得网约车平台经营许可，发放网约车驾驶证500多万本，同比增长28.9%。共享出行的兴起为人们出行带来了便利，交通出行从过去的单一模式转变为混合模式，网约车、共享单车、出行服务等共享出行方式，已逐渐成为出行的主流方式。群智能够为共享出行平台提供技术支撑，并更多地拓展到智慧交通产业的管理和服务运营版块，打造智慧交通大

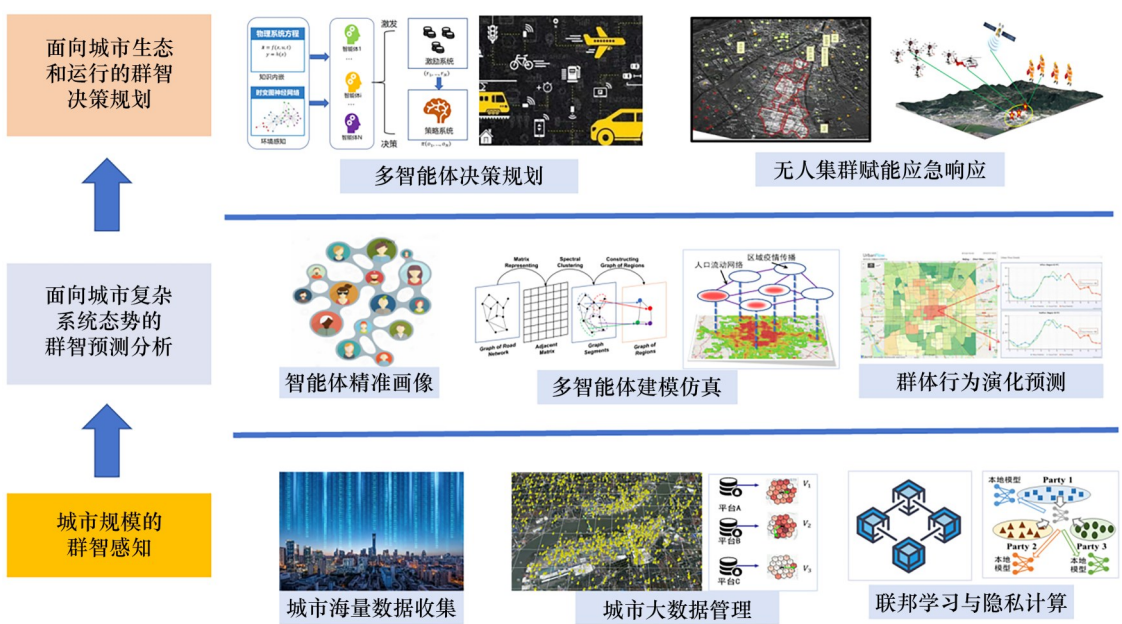

图2　群体智能技术支撑智慧城市产业

脑，为城市拥堵治理等突出问题提供解决方案。

（1）基于群智的交通需求预测和个体异质交通分配

群智技术将个性不同的出行者视为多个智能体，克服传统仿真中采用同质参数和路网内单一出行模式的局限，实施多智能体混合出行行为建模，通过相互协作、信息交流和合作来提升整个路网出行群体的效益，实现在仿真模型中对出行行为的精细刻画与预测。以流式多源时空交通数据为驱动，基于图神经网络来建模城市交通网络，引入多智能仿真和交通数理模型相结合的方式，实现精准交通态势预测。

（2）基于群智博弈的交通管理决策

智慧交通场景涉及大量的交通管理任务，如出行拥堵治理、信号灯优化控制、运力智能调度、基础设施规划等。这些管理服务都需要群智博弈决策技术来实现。

出行拥堵博弈：基于个体行为模型驱动的适变激励机制，构建激励机制对个体的引导博弈模型，动态调整激励策略，高效引导个体行为。例如，在出行高峰时段，通过疏导激励机制引导拥堵路段车辆绕行或错峰通行，以减少热点时段和路段的交通流量。

信号灯分布控制：城市交通信号灯控制受到当前路口历史车流量和周边路口车流量的影响。通过对历史车流量的变化规律和同属一个拥堵路段的路口车流量进行分析，从时间和空间两个维度在长期、大范围内挖掘出影响交通信号灯控制的最关键的影响特征，并对时空特征进行进一步融合。

电动汽车充电设施规划与管理：城市在发展新能源汽车的过程中，需要对相关的基础设施进行规划部署，并制定价格。基于多智能体系统优化决策技术，可以综合群体充电需求预测和充电桩规划算法，迭代优化充电基础设施的部署方案。基于多智能体的博弈决策技术，构造充电站定价模型，实现充电运营市场的优化管理。

智慧城市产业群除了日常的运行管理之外，还需要考虑应对重大突发事件，如严重的传染性疾病、水灾、台风等自然灾害对城市的破坏性影响。这类复杂系统的应急处理非常需要利用群智技术，建立监控预测、预案推演、应急决策的一体化平台，有力地支撑政府部门的全域监控、常态预防、快速决策、及时响应，从而保障在突发情况下城市平台经济的韧性。

2. 公共卫生监测预警和应急响应

群智技术有助于建立面向卫生安全的分布式社会治理智能系统，形成主动监测预警和有效阻断控制的公共卫生应对体系。

首先，对于全球性的重大突发传染病，要基于群智感知技术，实现智能化主动监测预警。通过汇集亿级规模社会人口、交通、气象及传染病等的跨界多源数据库，构建公共卫生和流行病学的知识图谱和重大传染病的智能化预警模型，以支撑传染病迹象的快速识别、及时预警，为提前做好医疗资源储备提供依据。

其次，在传染病流行期间，要及时开展新增确诊病例的发现、疫情溯源追踪、传播态势分析等工作。基于群智联邦学习技术，支撑卫生健康委员会、公安部门、交通部门等政府部门的协同合作，从多方的病历数据中实现联合筛查、智能流调与溯源。基于多智能体系统与优化技术，融合复杂网络动力学和深度神经网络，完成传染病传播建模和人口移动建模，建立跨时空、高精准和可解释的传染病态势预测模型。同时，基于群智理论的社会观点动力学等方法，可以对社会群体的行为和认知进行建模分析，为公众风险、行为规律及公众情绪引导的决策提供技术支撑。

3. 面向自然灾害和重大卫生事件的城市智能应急物流

群智技术对应急物流所涉及的风险监测、感知预警、应急规划和优化调配等关键问题都有重要的赋能作用。第一，群智感知技术实现应急保障系统的状况分析，基于风险耦合机理分析框架，实现应急物流仓储调配保障体系的弹性评估。第二，多智能体系统与优化决策技术支撑物流供应保障供需预测、大规模应急物资的智能调度管理、运输路线的动态优化等，从而面向各种灾害场景实现应急物资的预置规划与动态分配。

京东物流打通了应急物流管理平台与京东物流生产运营系统，将数字孪生和群智运筹优化技术结合应用至大规模物流场景，实现大规模物流全链路模拟仿真，通过低成本、快速迭代策略，可支持超过 5 万个物流节点、600 万条线路的物流网络，实现亿级包裹分钟级响应。

（三）基于无人集群的智慧农业和智慧港口

无人集群技术在单体的智能化嵌入式系统基础上，集成面向不同任务、不同类型的机器智能体，形成能够胜任多样性的复杂作业。下面以智慧农业和智慧码头两个产业为例，阐述无人集群技术的赋能作用。

1. 智慧农业

智慧农业是我国智慧经济发展的重要组成部分，通过物联网和人工智能等新技术能够有效解放人力，解决我国农业方面劳动力不足的问题。目前我国主要粮食作物基本实现全程机械化，利用数字化手段来提高农业装备的智能化程度，对于推动农业全流程的数字化进程具有重要意义。特别是农业生产的产中阶段，涉及了农作物的播种、施肥、灌溉、植保、收割、环境监测等众多环节，需要无人集群技术的支撑，构建农田环境自适应感知、农机行为控制、群体实时协作、智慧农场大脑等规模化作业典型场景，打造基于群智自主作业的智慧农场。

（1）群智感知实现农场环境与作物的精准感知

以卫星、无人机、固定摄像采集设备、自主农业巡检设备等作为群智化感知手段，构建面向农场环境与作物的“空天地”一体化高精度群智感知与认知物联网，建立农作物生长情景理解模型，揭示气象、农田对作物生长状态的作用规律，探究病、虫、草害的发生演化机理，实现农场环境的自适应全面感知和精准认知。

（2）群智决策支撑农事精准决策

针对基于经验模型的农事决策欠精准，农机统筹调度欠合理等问题，在农场全要素数据化、知识化的基础上，建立农场数据中心与知识仓库，结合作物数字生长模型和传统经验，基于多智能体系统与优化决策技术，研发数据、知识与经验协同驱动的精准农事决策。

（3）无人集群技术支撑多种农机协同作业

开展农机状态实时监控、无人驾驶关键共性技术研究及系统开发，研制整机控制的柔性集成与自主作业控制技术，实现农机设备的精准自主作业。在单体智能农机的无人驾驶和自主作业基础上，引入面向农业的异构无人集群协同技术，解决作业任务分配不科学、作业变动适应性差、作业异常响应不及时等问题。突破了多农机任务动态分配、协同路径规划、农机间组网与通信等关键技术，开发低时延、高鲁棒的群体协同与认知计算平台，实现农机设备的群体协同和人机协同。

2. 智慧港口

港口物流对国民经济作用巨大，我国是世界第一大贸易国，港口物流规模持续扩大。传统的港口码头属人力密集作业，自动化程度低、人工成本很高，亟需借助新的技术以实现无人化和智能化。由于码头环境存在资源类型多、业务耦合紧、环境不确定等特点，难以通过单一系统建模求解，需引入群智的建模和优化决策方法。同时，码头业务状态多变，作业高峰与故障意外因素易导致码头作业冲突阻塞，需引入面向异构环境的无人集群技术，实现复杂码头多智能的高效可信协同，以应对大规模作业时可能产生的冲突拥塞。

首先，要建立码头各类智能体和作业的模型。针对港口大型码头泊位、岸桥管理以及堆场、配载调度等关键业务环节，建立桥吊、水平运输AGV、龙门吊、道口等智能体模型，通过物联网感知和数字孪生技术，实现智能模型与机械实体运行状态的实时映射，形成与码头系统相对应的生产管理和设备运维多智能体系统模型。

其次，基于群智的“感知–预测–决策”技术框架，赋予码头智能体行为的协同交互与自主进化能力，可在超大型码头多场景变化下实施自适应的优化决策，支撑智能堆场选位、自动作业路径及泊位计划优化、水平运输车辆及新型轨道交通设备的协同调度等业务场景，从而形成覆盖码头智能规划运作、运行监测管理的智能化解决方案。

群智技术的引入有助于进一步提升码头运行的智能化水平，为推动我国主要港口的智能化升级提供可行的技术路线，从而为整个智慧港口物流行业注入新的发展动能。

五、群体智能赋能产业发展的对策建议

近年来，国家对新一代人工智能的发展进行了系统的布局，已经在群智领域形成了比较完备的技术体系，正在朝成果转化和大规模产业落地方向迈进。因此，深入探索群智的新业态、新模式，找到有效促进传统产业转型升级和新兴产业发展的新途径，培育新的数智经济增长点，成为需要高度关注的问题。

持续推动群智开源社区建设，集聚人工智能的高素质人才，形成强大的新型智能科技创新力量，打造人工智能科技创新生态系统的智力内核。以此为基础，激发整个生态的创新活力，形成一批满足群智重大应用需求的产品和解决方案，在智慧城市、智慧农业、智慧港口等重点领域，推动群智产品和服务达到国际先进水平，并同时构建形成“政产学研用”多方联动、协调发展的群智产业生态体系。

（一）着力构建人工智能开源社区，推动人工智能生态发展

开源是实现各类资源高效汇聚共享和协同创新的重要模式。目前，国内人工智能发展呈现百花齐放的态势，但尚缺乏有效的合作机制，难以形成协同效应。

推动构建“政产学研用”深度联接的人工智能群智开源社区。依托社区实现面向研究创新的云际算力资源普惠共享、各类数据资源的高效流通、人工智能模型的协同开发与各类知识资源的开放共享，强化人工智能领域的工程人才培养，传播推广最新的人工智能创新成果，建立人工智能教育–人才–创新链条。引入基于知识产权共享的开源社区持续激励机制，实现对开源社区各类贡献的确权存证与股权激励，提升国内人工智能的开源社区活力，更好地服务于从技术研发到商业运营的创新过程。

围绕国产基础软硬件发展自主的人工智能开源生态。与国际上英伟达+Tensorflow/Pytorch、微软Azure+OpenAI GPT 的主流生态相比，基于国产智能芯片和人工智能开发框架的生态仍然弱小。需要建立和壮大国产人工智能开源生态，加速国产人工智能技术创新，让更多的人来一起使用国产基础软/硬件，积极提供应用需求和改进意见，促进相关产品服务的性能提升。在当前生成式人工智能模型向通用智能发展的关键时期，需要更积极地发挥群智开源对发展生成式大模型的作用，包括汇聚训练语料和提示词、支撑价值对齐和治愈幻觉、促进大模型应用生态发展等。

（二）群体智能汇聚数智力量，夯实智慧城市的智能内核

深入挖掘群智在数字经济服务中的核心优势，引入基于群智的数字市场调节机制和金融保障机制，构建面向智能时代的新金融秩序，实现社会经济资源的有效供给、优化共享和可持续发展，为智能时代下共享经济的发展创造新形态和新增长点，推动智能社会共享社会经济服务产业的发展。

以群智技术为核心，结合当前的大模型和通用人工智能的发展趋势，研发基础模型增强的多智能体优化和社会仿真技术，推广基于群智的智能软件新架构，构造智能原生的基础设施与运行环境，支持智慧城市各类群智的应用系统开发，加快与群智相关的智慧城市重大场景的建设和发展，如智能交通、智能物流、智慧旅游、智慧健康等。

（三）群体智能通过无人集群技术赋能各行各业

克服基础开发框架和智能芯片生态薄弱等问题，围绕国产自主可控基础软/硬件，加速无人集群系统的集成攻关和部署应用，强化无人集群系统的国产化替代。同时根据各行业自身特点，设计合理的产业路线图，促进无人集群技术在这些产业中的深度发展。

在智能物流和智能码头等行业，无人集群系统已经在各自场景中得到广泛的应用，已经成为这些行业的关键技术。这就需要我们在目前产业落地的基础上，继续提质增效，深化智能化应用场景。特别是针对复杂多样的变化场景，通过引入新的具身智能技术与群智相结合，实现群体作业能力的灵活自组合和高度可泛化性，持续提升无人系统在这类场景的自适应作业能力。

在智能农业等快速发展中的行业，需要持续探索群智技术的落地途径，总结成功的实践案例，拓宽相关技术与现有行业装备的适配范围和业务领域，不断攻克行业真实存在的痛点和难点问题，从而推动大规模产业化实施。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 30, 2024; **Revised date:** February 26, 2024

Corresponding author: Wu Wenjun is a professor from Institute of Artificial Intelligence, Beihang University. His major research field is collective intelligence. E-mail: wwj09315@buaa.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on New Generation of Artificial Intelligence and Industrial Cluster” (2022-PP-07)

参考文献

[1] Li W, Wu W J, Wang H M, et al. Crowd intelligence in AI 2.0 era [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(1): 15–43.

[2] 罗杰, 姜鑫, 郭炳晖, 等. 群体智能系统的动力学模型与群体熵度量 [J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(1): 99–110.
Luo J, Jiang X, Guo B H, et al. Dynamic model and crowd entropy measurement of crowd intelligence system [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2022, 52(1): 99–110.

[3] Cerquides J, Farinelli A, Meseguer P, et al. A tutorial on optimization for multi-agent systems [J]. The Computer Journal, 2014, 57(6): 799–824.

[4] Ramaswamy S. The mechanics and statistics of active matter [J]. Annual Review of Condensed Matter Physics, 2010, 1: 323–345.

[5] Reynolds C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 25–34.

[6] Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles [J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6): 1226–1229.

[7] Gronauer S, Diepold K. Multi-agent deep reinforcement learning: A survey [J]. Artificial Intelligence Review, 2022, 55(2): 895–943.

[8] Dorigo M, Theraulaz G, Trianni V. Reflections on the future of swarm robotics [J]. Science Robotics, 2020, 5(49): eabe4385.

[9] Wang H M, Yin G, Li X, et al. TRUSTIE: A software development platform for crowdsourcing [M]//Li W, Huhns M, Tsai W T, et al. Crowdsourcing. Berlin: Springer, 2015: 165–190.

[10] 王怀民, 余跃, 王涛, 等. 群智范式: 软件开发范式的新变革 [J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(8): 1490–1502.
Wang H M, Yu Y, Wang T, et al. Crowd intelligence paradigm: A new paradigm shift in software development [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2023, 53(8): 1490–1502.

[11] Yang Q, Liu Y, Chen T J, et al. Federated machine learning: Concept and applications [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2019, 10(2): 1–19.

[12] Liu Y, Kang Y, Xing C P, et al. A secure federated transfer learning framework [J]. IEEE Intelligent Systems, 2020, 35(4): 70–82.

[13] Park J S, O'Brien J, Cai C J, et al. Generative agents: Interactive simulacra of human behavior [C]. San Francisco: The 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2023.

[14] Reed S, Zolna K, Parisotto E, et al. A generalist agent [EB/OL]. (2022-11-11)[2024-01-31]. http://arxiv.org/abs/2205.06175.pdf.

[15] Duan J F, Yu S, Tan H L, et al. A survey of embodied AI: From simulators to research tasks [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2022, 6(2): 230–244.

[16] Chen M, Tworek J, Jun H, et al. Evaluating large language models trained on code [EB/OL]. (2021-07-14)[2024-01-31]. http://arxiv.org/abs/2107.03374.pdf.

[17] Warnat-Herresthal S, Schultze H, Shastry K L, et al. Swarm learning for decentralized and confidential clinical machine learning [J]. Nature, 2021, 594(7862): 265–270.

[18] Kenney M, Zysman J. The rise of the platform economy [J]. Issues in Science and Technology, 2016, 32(3): 61–69.

[19] "十四五"数字经济发展规划 [EB/OL]. (2022-01-12)[2024-01-31]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2022-01/12/content_5667817.htm.
The Fourteenth Five-Year Plan for digital economy [EB/OL]. (2022-01-12)[2024-01-31]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/12/content_5667817.htm.

[20] "十四五"软件和信息技术服务业发展规划 [EB/OL]. (2021-01-15)[2024-01-31]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2021-12/01/content_5655205.htm.
The Fourteenth Five-Year Plan for software and information technology service industry [EB/OL]. (2021-01-15)[2024-01-31]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/01/content_5655205.htm.

[21] 2022 中国开源贡献度报告 [EB/OL]. (2022-10-24)[2024-01-31]. https://baike.baidu.com/item/2022 中国开源贡献度报告/62103445.
2022 Annual report on China open source contribution [EB/OL]. (2022-10-24)[2024-01-31]. https://baike.baidu.com/item/2022 中国开源贡献度报告/62103445.

[22] 新思科技. 2020 开源安全与风险分析报告 [EB/OL]. (2020-06-01)[2024-01-31]. https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/china/software-integrity/reports.
Synonpsys. 2020 annual report on open source safety and risk analysis [EB/OL]. (2020-06-01)[2024-01-31]. https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/china/software-integrity/reports.

[23] 中国开源发展蓝皮书 [EB/OL]. (2023-06-15)[2024-01-31]. https://gitcode.net/COPU/2023.
China open source blue book (2023) [EB/OL]. (2023-06-15)[2024-01-31]. https://gitcode.net/COPU/2023.

[24] 国家信息中心. 中国共享经济发展报告 2023 [EB/OL]. (2023-02-23)[2024-01-31]. http://www. sic. gov. cn/sic/93/552/557/0223/11819_pc.html.
National Information Center. 2023 annual report on development of sharing economy in China [EB/OL]. (2023-02-23)[2024-01-31]. http://www.sic.gov.cn/sic/93/552/557/0223/11819_pc.html.