

智能区块链与区块链智能：构筑DePIN的基础设施智能

李娟娟^{1,2}, 管桑田^{1,2}, 秦蕊^{1,2}, 侯家琛³, 王飞跃^{2,3}

(1. 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室, 北京 100190;

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. 澳门科技大学创新工程学院, 澳门 999078)

摘要: 去中心化物理基础设施网络是未来数字社会不可或缺的基石, 它将传统依赖于集中式控制和管理的物理设施转变为由社区驱动且自主治理的新型基础设施网络, 而区块链与人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的深度融合在其中起到了关键的赋能作用。为此, 首先强调有机结合“AI赋能区块链”与“区块链赋能AI”, 形成协同增效的双向闭环回路, 以构建真正意义上的智能区块链, 从而实现区块链智能新范式。其次, 提出智能区块链的新型技术架构: 一方面, 将智能性内嵌至传统区块链架构的每一层, 以培育从基础智能到基础设施智能再到应用智能的区块链智能生态; 另一方面, 为实际智能区块链构建与之对应的人工的智能区块链, 并通过二者的虚实反馈与平行执行, 形成从静态规则导向到动态适应演进的区块链智能生态。然后, 从智慧合约、去中心化身份、知识管理、自主治理等角度辨析区块链智能的核心智能属性。最后, 概述区块链智能的典型应用场景及面临的关键挑战。积极推进智能区块链与区块链智能技术的研究与发展, 有助于构筑未来数字时代的核心基础设施。

关键词: 去中心化物理基础设施网络; 区块链智能; 智能区块链; Web 3.0; 基础智能; 基础设施智能

中图分类号: TP39

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202403

Intelligent blockchains and blockchain intelligence: the infrastructure intelligence for DePIN

LI Juanjuan^{1,2}, GUAN Sangtian^{1,2}, QIN Rui^{1,2}, HOU Jiachen³, WANG Fei-Yue^{2,3}

1. State Key Laboratory of Multimodal Artificial Intelligence Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

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

3. Faculty of Innovation Engineering, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

Abstract: Decentralized physical infrastructure networks (DePIN) were an indispensable cornerstone for the upcoming digital society, transforming traditional infrastructure reliant on centralized control and management into a new type of infrastructure network driven by communities and autonomous governance. The deep integration of blockchain and artificial intelligence (AI) technologies played a key role in enabling this transformation. To this end, this paper first emphasized the organic combination of “AI for blockchain (AI4B)” and “blockchain for AI (B4AI)”, forming a synergistic, bidirectional closed-loop circuit to construct the truly intelligent blockchains, thereby realizing a new paradigm of blockchain intelligence. Secondly, it proposed a novel technological architecture for intelligent blockchains: on one hand, embedding intelligence into every layer of traditional blockchain architecture to cultivate the blockchain intelligence ecosystem rang-

收稿日期: 2024-02-03; 修回日期: 2024-03-01

通信作者: 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62103411); 澳门特别行政区科学技术发展基金资助项目 (No.0093/2023/RIA2, No.0050/2020/A1)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62103411), The Science and Technology Development Fund, Macao SAR (No.0093/2023/RIA2, No.0050/2020/A1)

ing from foundational intelligence to infrastructure intelligence and then to application intelligence; on the other hand, corresponding to the actual intelligent blockchain construction, artificial intelligent blockchain were built, and through their virtual-real feedback and parallel execution, the blockchain intelligence ecosystem evolved from static rule orientation to dynamic adaptive evolution. Then, it analyzed the core intelligent attributes of blockchain intelligence from the perspectives of intelligent contracts, decentralized identity, knowledge management, and autonomous governance. Lastly, it outlined the typical application scenarios of blockchain intelligence and the key challenges faced. This paper aims to actively promote the research and development of intelligent blockchains and blockchain intelligence technologies, laying the foundation for building the core infrastructure of the future digital age.

Key words: decentralized physical infrastructure networks, blockchain intelligence, intelligent blockchains, Web 3.0, foundation intelligence, infrastructure intelligence

0 引言

物联网 (internet of things, IoT)、人工智能 (artificial intelligence, AI) 以及 Web 3.0 等新兴技术的深度融合为数字时代带来了前所未有的变革契机, 而这一融合进程的关键是去中心化物理基础设施网络 (decentralized physical infrastructure networks, DePIN)。DePIN 由专注独特商品和服务供给的物理资源网络 (physical resource networks, PRN) 和专注数字资源供给的数字资源网络 (digital resource networks, DRN) 构成, 旨在整合和激活分散的物理资源, 以构建庞大的基础设施网络, 从而解决现实世界中物理基础设施分散且低效的问题。DePIN 以其独特的架构理念和技术创新, 不仅重构了传统物理资源的管理模式, 更为实现人、机、物以及数据与价值在网络空间的有效连接与互动提供了全新可能。中国香港的 Web 3.0 标杆性企业 HashKey 为 DePIN 设计了一个精练的公式: $\text{Web 3.0} + \text{AIoT} = \text{DePIN}$ 。其中, AIoT 表示人工智能物联网 (artificial intelligence of things, AIoT)。该公式传达了“通过 Web 3.0 承载通用人工智能 (artificial general intelligence, AGI) 在物联网中创造的价值”这一先进理念, AGI 赋予物理设施意识和理解力, Web 3.0 提供信用与价值基础, 而 IoT 设备与区块链上资产的映射将为其创建不可篡改的身份与价值容器^[1-2], 从而支撑数据与设备行为的价值化, 并通过去中心化交易所 (decentralized exchange, DEX) 进行供需匹配与流通。DePIN 将现实世界的实体资源映射至数字世界, 并通过区块链技术的分布式账本特性确保了资产确权的安全性与透明度, 同时利用智能合约技术实现了资源使用权的自动化管理和流转, 有力地践行了 Web 3.0 的核心

理念——用户主导与数据主权。与此同时, DePIN 还巧妙地结合了 AIoT 的技术优势, 通过物联网设备的大规模接入与智能化管理, 进一步释放了物理基础设施的潜力, 使其能更加灵活高效地服务于各类应用场景。

可以看出, 要真正构建 DePIN 并充分挖掘其在网络空间的“软智能”实力, 形成高效的数字资源价值流通网络, 无法单凭 AI 或区块链技术实现, 必须将二者进行深度融合, 形成智能区块链, 以实现区块链智能, 从而提高 DePIN 的安全性、自主性与灵活性。首先, 通过智能合约自动执行交易和操作, 区块链智能为 DePIN 提供了一个无须信任的自动化执行机制, 而这种自动化不限于简单的交易处理, 更涵盖了复杂的决策制定和任务管理, 以提升 DePIN 的透明性与不可篡改性。其次, 区块链智能支撑的去中心化自治组织与运营 (decentralized autonomous organizations and operations, DAOs)^[3-4] 及其高级版本的 TRUE 自治组织与运营 (TRUE autonomous organizations and operations, TAOs)^[5-6], 更好地支撑激励驱动、权属确立且隐私保护下的自主资源共享, 是 DePIN 用户和设备的去中心化可信组织和管理模式。最后, 区块链智能具备灵活的自适应机制, 使得 DePIN 能够动态适配外部环境和内部需求, 从而实现了持续的优化和进步。因此, 区块链智能是 DePIN 实现其愿景的关键技术支柱, 它不仅提供了去中心化的基础设施, 还引入了智能化的决策和操作能力, 为 DePIN 打造了一个全新的未来蓝图。

虽然智能区块链与区块链智能都已不是新概念^[7], 但无论学界还是产业界均缺乏对其深入且系统的理解。目前的工作更多关注于如何利用 AI 在数据分析、知识自动化与决策支持方面的优势解决

区块链所面临的问题^[8-9]。这种过分关注“为区块链服务的AI（AI for blockchain, AI4B）”的研究趋势，一定程度上忽略了“为AI服务的区块链（blockchain for AI, B4AI）”所承载的关键价值及其在DePIN及未来数字社会建设中的重要作用。从B4AI角度看，区块链技术在保障与AI相关的数据完整性、可追溯性和安全性方面发挥着不可或缺的作用，从而促成区块链与AI之间形成双向赋能的互补增强关系，使AI能够反过来提升区块链技术的信任智能。当前研究对于这种双向赋能的理解并不均衡，促使本文深入研究并全面探索区块链智能，将AI4B与B4AI有机结合，构建一套完善的智能区块链技术体系架构，明确界定区块链智能的核心属性，并探讨其面临的挑战与难题，以期推动区块链智能在理论与应用上的双重突破与发展。

本文的核心贡献可概括为：1）通过AI4B与B4AI的有机融合，重新定义了智能区块链与区块链智能，并在此基础上构建了一个由基础设施智能演化至应用服务智能的智能生态，以更好地服务于DePIN及其支撑的新型数字社会；2）提出了一种虚实交互的智能区块链技术架构，使智能性贯穿于传统区块链架构的各个层面；3）从合约、身份、数据和治理4个角度，深入剖析了区块链智能的核心智能化特征。

本文结构安排如下：第1节综述AI4B与B4AI的研究进展；第2节定义智能区块链与区块链智能；第3节提出虚实互动的智能区块链技术架构，并探讨了AI技术与算法如何为传统区块链每一层赋予智能性；第4节阐述区块链智能的核心属性，强调其有别于传统区块链的智能性特质；第5节探讨区块链智能的应用场景及其面临的挑战；第6节总结全文并展望未来研究方向。

1 相关工作

本节将探讨区块链与AI如何相互赋能，并从AI4B与B4AI双重角度，概述区块链与AI融合在当前研究进展。

1.1 AI4B

本节将从数据处理、智能合约、共识算法、激励机制、通信控制以及网络结构等方面，讨论AI模型与算法如何增强区块链的智能化程度。

（1）数据处理：在数据采集层面，AI能够聚合众多外部数据源的信息^[10]，并能增强预言机技

术^[11]，从而将链下数据上链，并保障其真实性、完整性、准确性与一致性，增强链上数据的丰富性和可信度^[12-13]；在数据存储层面，AI技术能有效地编码与压缩数据，同时利用自动化数据清理和预处理技术，有效减少重复、无效或错误的数据，以此降低数据冗余并提升数据质量^[14]；在数据分析层面，AI高效的计算与处理能力，使其可以持续监控异常活动，识别区块链网络中的潜在威胁和恶意行为（如不合规交易或数据篡改），并主动进行风险预警，大幅提高了数据的安全性和处理效率^[15]；在数据交互层面，通过采用隐私计算和联邦学习等隐私保护技术^[16]，AI实现了数据在处理和析阶段的加密、混淆与匿名化，保护了用户隐私^[17]，同时激励了更多节点加入数据共享和协作^[18]。

（2）智能合约：在合约生成层面，大模型等AGI技术的兴起，使得AI的自然语言处理能力和交互能力大大提升，从而能够更好地理解文本、提取规则并自动生成智能合约代码。在合约检测层面，AI能够有效地监测并自动修正智能合约中的错误或漏洞^[19]，降低合约运行的风险和损害。在合约优化层面：一方面，AI通过分析交易历史以及区块链网络的拥堵状况，精准优化合约的代码和结构，进一步提升了智能合约的执行效率，有效地减少了交易确认时间，降低了成本；另一方面，AI能够增强智能合约的学习能力和动态适应性，使得智能合约能够根据不断变化的环境和需求进行自我调整和优化^[20-21]。

（3）共识算法：从安全性考虑，AI通过在共识过程中识别并阻止双重支付和女巫攻击等恶意行为，有效地保障了交易的完整性。同时，AI还能解析共识网络中的算力分布，预见并阻断通过聚集算力发起的51%的攻击，确保交易的安全性^[22]。从效率性考虑，AI深入分析节点的表现与行为，据此评估其声誉并分配声誉点数，显著提升了共识的效率与可信度。此外，AI监测网络流量及负载，通过智能算法调节共识难度，加速了区块确认与交易验证的过程，从而降低了能耗并优化了共识性能^[23]。

（4）激励机制：AI能针对任务类型与需求，通过合约智能分配任务给合适的节点^[24]，并持续监控协作过程以进行实时优化，从而确保任务的分配与执行的时效性和公正性，进而在此基础上实时自动地评估用户行为并量化其贡献，为参与节点匹

配个性化的激励方案^[25]。进一步地, AI还可以基于对网络状况和激励目标的预测, 动态调整激励方案, 以优化激励机制的公平性和有效性, 激发更多节点的参与积极性^[26]。

(5) 通信控制: 从保障安全出发, AI通过实时监测区块链网络状态(包括节点可用性、网络拥堵状况及交易速度等), 主动识别和预防潜在的通信安全隐患(例如: 网络攻击、恶意节点^[27-29]的异常行为^[30-31]等); 从优化效能出发, AI还可以支撑自适应智能通信网络的构建, 基于对网络流量和负载的智能分析, 自动调节通信带宽并动态优化通信路径和网络资源分配^[32], 从而有效地减少网络拥堵和延迟, 提升通信的效率和速度。

(6) 网络结构: 通过AI构建的智能体能够作为虚拟节点, 集成进区块链网络并参与记账及交易验证过程。这一机制不仅提升了节点的活跃程度, 缩短了达成共识的时间, 还有效降低了系统受到攻击的风险^[33]。同时, 通过多智能体系统生成大量人工数据与场景, 能够有效检测区块链智能合约中的编码错误或安全漏洞, 并对共识机制的效率进行验证和评估, 极大地降低了区块链系统潜在的安全风险^[34]。此外, 智能体还可以对区块链数据进行深度分析, 以辨识出其趋势及异常, 预测网络的未来动态, 为区块链网络中的节点提供实时信息、建议及数据可视化工具, 从而提供最优决策的辅助。

1.2 B4AI

区块链与AI的整合远非简单的技术融合。本节将从计算资源分配、模型训练、部署运行等AI生命周期的关键节点, 讨论区块链如何为AI领域关键的信任问题提供去中心化、透明以及安全的解决方案。

(1) 计算资源分配: 数据与算力是支撑AI模型的基础资源, 而数据安全以及隐私保护、算力的稀缺以及分配不均等都是当下AI技术发展的痛点。从数据层面而言, 区块链技术借助内生分布式账本的技术特性, 赋予数据收集以可追溯性、不可篡改性^[35], 保障高质量训练数据的完整性^[36]。在此基础上, 区块链通过差分隐私技术保护深度神经网络训练时的敏感数据^[37-38], 确保了数据隐私的安全性。区块链技术还能助力于构建去中心化的机器学习系统, 打造安全的数据共享平台^[39-41]。从算力层面而言, 区块链技术可以通过分布式账本进行P2P算力组网, 基于其透明性与不可篡改性的内生特性

形成协同计算共识并在此基础上构建算力市场^[42-43], 允许节点在去中心化网络中安全、公平地交易富余的算力资源, 从而增强了大数据算法系统的训练与运算资源的调配能力, 为AI创造安全、鲁棒的数据共享与计算环境。

(2) 模型训练: 区块链技术的透明性和不可篡改性, 为AI模型的训练提供了新的范式。AI市场允许节点间交易模型参数, 降低同类型节点试错成本的同时, 还能激励节点形成有效竞争, 从而提高模型精度^[44], 而区块链技术可以有效地保障AI市场中设备间通信和协调的安全性与可靠性^[45-46], 是构建公平、透明的AI模型参数市场的理想选择^[47]。区块链与深度强化学习的结合不仅实现了交易记录的不可篡改性, 也增强了大数据分析的预测能力, 为AI市场的发展提供了坚实支撑^[48]。联邦学习是一种带有隐私保护、广泛适用的分布式AI训练范式, 将其与区块链技术结合对通信信息进行可信压缩, 可以提高其训练效率^[49-50], 基于智能合约编码激励机制可以鼓励优质节点加入, 从而提高模型训练的泛化性与鲁棒性^[26,51-52], 并进一步放大强化学习在数据隐私安全层面的优势^[53-55]。

(3) 部署运行: 在模型部署与运行阶段, 区块链的应用从安全度、可信度等维度为AI赋能, 促进了安全的去中心化数据管理以及机器学习算法去中心化部署的发展^[56]。从安全度的角度出发, 结合区块链和深度学习技术, 对分布式设备进行实时异常检测与安全检查, 确保所得数据在无人系统中能够被安全高效地处理与应用^[57-58]。从可信度的角度出发, AI模型的推理计算可以托管于链上虚拟机中, 借由智能合约对模型进行调用^[59], 保证模型的输入输出数据免受第三方篡改, 从而提升智能算法应用的可信程度^[60]。借助区块链技术, 智能应用可以摆脱中介平台的影响, 从而以相对独立而分布式的方式为用户提供智能化的服务^[61], 并通过智能合约技术与共识机制建立起全新的协调范式, 提升系统的安全性、自主性及灵活性^[62-63]。进一步地, 区块链利用机制设计和博弈论保障分布式AI模型得以安全地更新参数, 可以大幅减少运行过程中的恶意攻击, 降低数据泄露的风险^[64]。

2 智能区块链与区块链智能的概念

基于AI4B和B4AI的有机融合与双向互动, 本文对智能区块链及区块链智能的概念进行了深度重

塑。智能区块链是指将AI技术与算法融入去中心化区块链网络中，以提升其功能与性能的智能化水平，进而构建安全、可信且高效的AI基础设施，从而形成区块链智能新范式（智能区块链与区块链智能如图1所示）。在这一创新性概念体系之下，AI与区块链的技术提升呈现出显著的双向协同效应：一方面，AI4B通过不断提升区块链的数据处理效率与智能决策能力，推动其功能边界不断拓展；另一方面，B4AI则致力于增强AI系统的安全稳定性和可信度，而区块链为AI提供的有效反馈将进一步应用于优化区块链底层架构及其应用效能。两者相辅相成，构建起一个循环强化、持续演进的闭环机制，不仅弥补了各自的短板，还放大了它们的优势，进而构建了一个更高级、安全、智能的区块链网络。

针对DePIN及与其密切相关的Web 3.0未来互联网发展需求，本文特别强调区块链智能是一种涵盖基础智能、基础设施智能与应用智能的生态智能。其中，基础智能专注于从智能科学角度提升共识、合约等核心组件性能并优化区块链的基础结构，以提升区块链的安全性、效率与可扩展性等，从整体架构层面提升区块链的智能化水平。基础设施智能侧重于为区块链提供高级的智能设施支持，涉及实时数据处理、资源分配与管理、容错机制、能效优化与决策支持等功能，旨在支撑区块链实现复杂智能特性。应用智能则负责推动区块链技术在各种去中心化应用场景中的智能化进程，激发区块链技术的创新潜力，并拓宽其在现实世界中的应用边界。

3 智能区块链的技术架构

为了支撑DePIN弥合数字世界与物理世界的鸿沟并实现二者的无缝整合与互动，本文为智能区块链设计了一种虚实交互的技术架构（如图2所

示），其除了在现实世界构建的实际的智能区块链之外，还在虚拟空间或元宇宙^[65]中构建人工的智能区块链^[66-67]，以便开展现实中难以实现的实验与探索^[68-69]，并通过二者之间的虚实交互与平行执行机制，对实际智能区块链进行描述、预测与引导^[70-72]。这种平行架构将有力推动区块链生态系统从传统的静态规则依赖状态进化为具备动态适应能力的新格局，从而使其在功能进化维度上展现更为显著和高效的智能属性。

该架构将AI技术与算法的智能性内嵌至传统区块链的每个层级，包括数据层、网络层、共识层、价值层、合约层以及应用层，推动区块链技术从基础智能向应用智能的进化，使得区块链在生态构建维度上具备更完备和全面的智能属性，从而培育一个综合且全面的区块链智能生态。其中，以大模型或基础模型为代表的AGI技术将作为智能区块链的智能性基石^[73-75]，高效地处理区块链海量数据与复杂网络通信等。在此基础之上，IoT数据感知工具、数据处理工具以及多样化的智能组件等，将共同为智能区块链生态构筑基础设施智能。最后，这些技术和工具通过场景工程（scenarios engineering, SE）技术不断得到精炼^[76-77]，并在各种共识机制、价值机制以及智能合约定义下的区块链环境和事件中进行反复的深度测试，以支撑面向人的操作系统（human-oriented operating systems, HOOS或H2OS）将智能区块链中的复杂决策过程与以人为本的优先级对齐^[77-80]，从而实现用户友好的应用智能。

（1）数据层：智能区块链需要能够安全而稳健地搜集和存储数据，以支持区块链中各种功能和应用。AI的引入将辅助区块链时间戳的验证与审计，以确保数据的可靠性。同时，利用AI分析与优化区块链的数据结构，提升数据存储效能。此外，AI驱动的数据隐私保护技术与传统区块链算法融

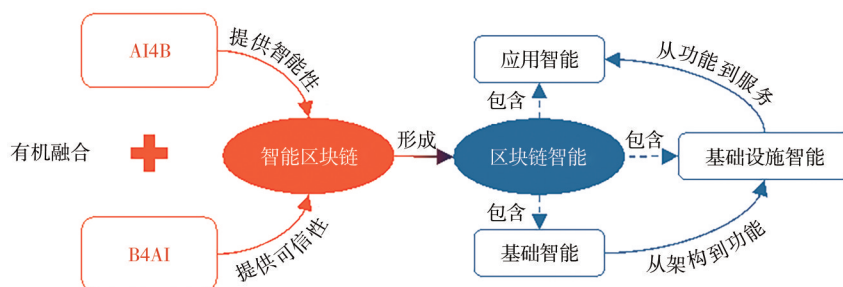


图1 智能区块链与区块链智能

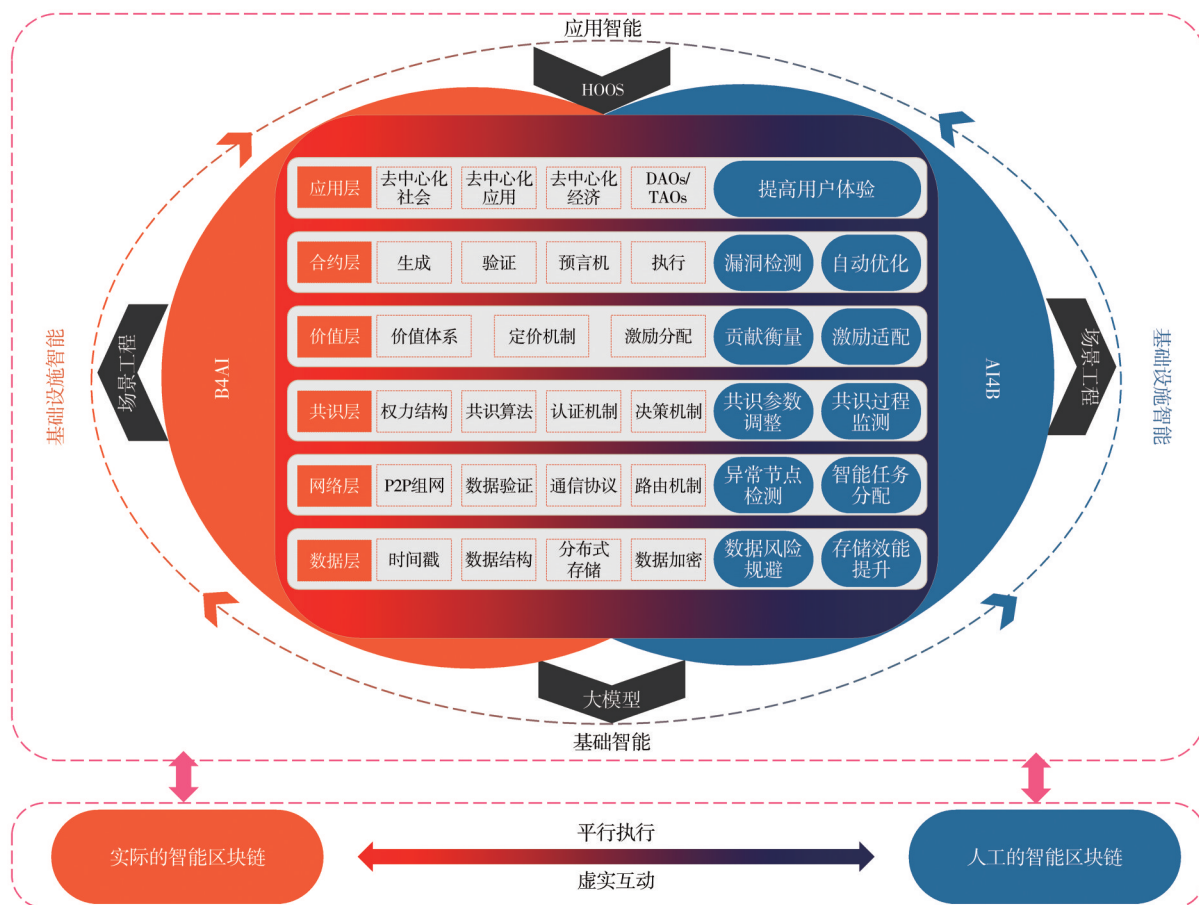


图2 智能区块链的技术架构

合，确保敏感数据在区块链上安全地存储与传输。最后，AI还将均衡区块链的去中心化存储和负载，以提高区块链系统的可用性和鲁棒性。

(2) 网络层：在保障安全组网与通信的前提下，智能区块链还需为智能模型提供稳定的算力。从点对点（peer-to-peer, P2P）网络的视角出发，引入AI识别恶意或不稳定的网络节点，维护整个网络的安全性。同时AI还将验证和审计数据，避免数据传输过程中的错误或篡改。另外，基于网络流量和拓扑结构定制的智能路由技术，结合基于可信AI的通信协议设计，将进一步提升区块链网络的通信效率和稳定性。

(3) 共识层：在智能区块链系统中，共识过程需要考量更复杂的参与主体，共识目标将面临更高的智能性与效率性要求。AI将实时监控共识过程，从权力结构、共识算法、决策机制以及授权机制等角度，动态调整各类共识参数，以确保区块链系统高效地产生稳定且可靠的共识结果。此外，内嵌智能性的区块链共识机制将显著提升智能体的共识

效率。

(4) 价值层：Web 3.0作为一个价值互联网，包含了数据、知识、注意力、信任、通证等关键生产要素^[4,81]，而DePIN也需要通过价值激励用户共享资源。智能区块链的价值层将定义与管理价值的生产与分配过程，借助AI构建内生信任的开放价值体系，基于价值分析与预测形成智能化的贡献衡量方法及动态适应的分配机制，从而提供稳定的价值体系与维护机制。

(5) 合约层：智能合约中的智能性体现在合约生成、验证、执行等整个生命周期。在智能区块链中，AI通过自然语言处理技术将人类语言翻译成智能合约代码，使得智能合约的创建更为高效便捷；AI自动检测合约中的潜在错误或漏洞，使得智能合约更安全；AI还能监控智能合约的执行条件并自动获取外部数据，使得智能合约更高效可信。智能区块链中的合约层不仅提升了智能合约的智能化水平，还助推了AI面向区块链的数据训练与任务处理能力的双重强化。

(6) 应用层：作为智能区块链对外赋能的直接窗口，应用层涵盖去中心化应用（decentralized applications, DApp）、DAOs 和 TAOs、去中心化经济（decentralized economy, DeEco）和去中心化社会（decentralized society, DeSoc）。其将区块链与AI的能力直接融合到实际应用中，从而产生更广泛的社会影响。

4 区块链智能的智能特性

区块链智能所展现的潜力远超简单的执行自动化，它象征着区块链固有特征与AI技术能力的深度融合，共同塑造一个全新的去中心化智能范式。在此范式下，区块链的功能不限于执行预设规则与指令，进一步扩展到理解和动态适应各类任务，并在合约、身份、数据乃至治理等方面都引发了智能化变革。

(1) 从智能合约到智慧合约：智能合约是区块链的核心组成部分，基于预定义的“IF-THEN”规则自动执行相对简单的任务。相比而言，在智能区块链系统中的智慧合约需要具备自学习和自适应能力，能够以更精细而准确的方式处理更高级而复杂的任务。智慧合约得益于AI技术与算法赋能，在自动化之外还具备真正的智能性和灵活性^[82]。具体而言，在面对Web 3.0不断变化的环境和需求时，智慧合约相比传统的静态智能合约，在无须人工干预的情况下，通过自学习与自适应即可自发升级与优化，直至有效地响应外部环境的变化。这一智能化演变通过构建一个不仅执行任务还理解和适应任务的区块链新框架，支持区块链智能新范式，最终促进了具备更强适应性的智能区块链体系的形成。

(2) 从去中心化分身到去中心化身份：在传统的区块链网络中，人类的虚拟分身或数字投影占据了主导地位。尽管这些分身确实拥有数字世界或虚拟世界的去中心化身份（decentralized identity, DID），但它们仍受人类控制与约束，并不是真正意义上独立的个体。从这个角度来看，传统的区块链本质上是由去中心化分身（decentralized avatar, DA）所组成的网络。而在区块链智能的框架内引入数字人或智能机器，使得DID不仅是人类的代理，更能成为具有自主决策能力的独立实体。他们能够独立决策与自主运作，从而确保了区块链网络的自治性和智能化。此外，区块链智能通过AI生物识别技术，分析网络访问行为和硬件使用情况，

为DID的应用与普及提供了强有力的支持，以便更准确且高效地验证用户身份。在降低应用门槛的同时，DID还能将现实世界的实体完整映射到数字社会中，实现了Web 3.0及未来数字社会的真正自治。

(3) 从数据管理到知识管理：在传统的区块链中，数据主要以去中心化的方式进行存储和管理，这种方式保障了数据的公开透明、可追溯且不可篡改，适用于对信任度和透明度有更高要求的应用场景。但是这种数据管理方式对于实现区块链全局优化和促进生态系统发展的目标而言并不智能，尤其在异常检测、数据解释、洞见生成和决策支持等关键环节，而区块链智能则通过引入AI，为自身赋予更为先进的数据分析和管理能力。例如：在数据收集方面，区块链智能通过定位区块链节点和位置，识别数据模式和异常并调整数据收集策略，有效地提高了数据收集效率并降低了成本；在数据存储方面，区块链智能采用了更优的存储策略，能够平衡可扩展性、去中心化和安全性。更为关键的是，区块链智能范式下的数据管理范畴已经超越了传统的数据存储和维护，进一步扩展至知识管理。AI模型和算法的加持使得区块链智能得以挖掘更多知识，自主应对复杂任务并提供更智能的解决方案^[83]，从而支撑区块链网络的决策智能过程。

(4) 从自动治理到自主治理：传统的区块链通常采用自动化治理，依赖智能合约预定义自动化规则进行机械化决策，这容易导致区块链在面对紧急或未知情况时，所产生的治理结果往往缺乏说服力与可靠性。此外，由于区块链节点间治理权力分布存在不均衡现象，决策过程及其结果实质上被少数拥有较大影响力的寡头节点所把控，在实践中显著削弱了自动化治理不受人为干预的天然优势。为了解决这些问题，智能区块链采用动态治理权分配、个性化激励机制以及平行智能进行治理提案描述、预测和引导，构建了一套智能的自主治理体系。这套体系能够有效缓解长尾数据短缺问题，消除治理过程中的不公平分配现象，从而极大地提升区块链节点参与的积极性和治理的民主性，确保了智能区块链中治理的公平性和可靠性。

5 区块链智能的应用挑战

区块链智能不仅能改善现有的网络基础设施，还能推动新型应用和服务的发展，为构建更加公

平、透明和高效的未来世界提供强大的物理基础设施,在Web 3.0时代创造出一系列具有变革性的应用场景。

(1) 城市管理:基于智能区块链技术,城市的基础设施,例如:能源供应、交通系统、公共设施维护等可以实现去中心化的实时监测和智能化调度,以确保资源调度和分配的优化与调整,从而提升资源利用效率。

(2) 资产确权:对于实物资产如房地产、艺术品或其他贵重物品,区块链智能结合DePIN不仅可以自动化创建无法篡改的所有权记录,还能追踪物品从生产到流转的全生命周期,并智能化处理产权交易、租赁协议履行以及合规检查等环节。

(3) 共享经济:在共享出行、共享空间等领域,区块链智能支撑闲置资源和资产的自由交互,并通过智慧合约自动完成验证、计费与支付,进而构建无须中介的共享经济DePIN网络。

(4) 公共服务:基于区块链智能构建身份认证体系和基于投票的民主决策系统,社区居民或社会公民参与公共事务决策,诸如社区资金使用、公共设施升级等事项,而决策过程和决策结果不仅会被记录和执行,而且会被分析以用于机制和策略的动态调整。

(5) 可持续发展:各类传感器节点以去中心化自治的方式组织起来,构成感知任务导向的DAO/TAO(sensing DAO/TAO),通过智慧合约自我管理和协同工作,自动地感知和搜集空气质量、水质、土壤污染等数据,并记录在区块链上以确保数据的真实性与不可篡改性,进而利用AI模型与算法进行数据分析与推理,并依据基于生态指标的规则自动触发补偿机制或政策实施。

尽管区块链智能在应用方面展现出了巨大潜力,其在技术、治理与应用方面仍然面临着一系列复杂而严峻的挑战。

(1) 技术瓶颈:首先,在智能区块链系统中,可扩展性和安全性平衡仍然是一个亟待解决的问题。尽管区块链智能通过集成AI技术与算法以提升系统扩展能力和运行效率,但这一过程中也可能产生新的安全风险;与此同时,为保障安全性而采取的资源限制措施,又在一定程度上制约了系统的可扩展性。其次,以AGI为代表的新一代AI技术的融合使得智能区块链面临更严格的数据基础要求,因为需要确保数据在上链的过程中仍然有足够

的可信度和可靠度,所以高效的数据监控和验证方法以及相应的容错机制必不可少。最后,智能区块链复杂的网络节点构成与虚实空间融合特性,对跨链与跨网的互操作性提出了更高的要求,从而使得合适的协作模型与协议至关重要。

(2) 治理困境:一方面,传统区块链治理依赖共识算法、智能合约、社区投票以及硬分叉和软分叉等机制,而智能区块链需要具备更高灵活性、安全性、合规性以及自治性的治理机制与方法,以应对复杂多元主体以及虚实空间融合挑战^[84-85]。去中心化管理(decentralized management, DeMana)^[78-86]能够基于DAO/TAO构建兼顾多方需求的治理体系。另一方面,区块链智能将数据、注意力和信任作为Web 3.0的生产要素,从而推动了智能技术驱动的数字经济发展,然而这一过程超越了传统经济理论的阐释范畴。DeEco通过虚拟和实际经济系统之间的双向闭环反馈扩大供需空间^[87],统一了从需求到供给及从供给到需求的经典经济理论,以准确捕捉供需动态^[88],从而支持更精确的治理决策。然而,当前DeMana和DeEco理论研究还处于起步阶段,尚缺乏系统性的研究框架与理论模型,无法很好地支撑智能区块链治理。

(3) 应用壁垒:区块链技术融合了加密技术、分布式系统、群体共识等多领域的复杂知识,使用者需要越过较高的知识和技能门槛。与之相对应的,智能区块链通过广泛任务的处理能力、对人类意图和情感的理解能力、在非正规情况下做出适应性决策的自主学习能力,大幅降低了用户的技术门槛。为了在Web 3.0各种应用场景和更广泛的智能社会环境中充分实现区块链智能,需要适宜的智能解决方案和用户友好的易用界面。虽然AGI已经使得HOOS的构建初现雏形^[89-91],但这还不够,目前仍迫切需要在智能合约语言、区块链基础设施和场景工程方面突破,真正实现应用智能。

6 结束语

为了服务于DePIN及其支撑的新型数字社会建设,本文超越了单向的AI4B模式,通过将其与B4AI模式有机结合,提出智能区块链新概念,实现区块链智能新范式。本文为智能区块链设计了虚实融合、智能内嵌的技术架构,通过虚实智能区块链的互动反馈与平行执行实现功能进化维度的智能属性,通过从基础到设施再到应用层面的智能技术内

嵌实现生态构建维度的智能属性。从传统区块链的核心要素角度考虑, 这些智能属性主要体现在合约、身份、数据以及治理等角度, 促使智能合约向智慧合约转变, 去中心化分身向去中心化身份转变, 数据管理向知识管理转变, 自动治理向自主治理转变。此外, 本文还讨论了区块链智能如何与DePIN结合服务于变革性应用场景及可能面临的挑战。

目前, 尽管区块链技术与AI技术发展得如火如荼, 区块链智能还处于研究和应用的早期阶段, 主要工作集中在技术优化和性能提升上, 重点关注如何通过智能算法和协议设计来提升区块链系统的效率和安全性。然而, 区块链智能的发展远不止于此。首先, 如何在保证安全性和可信度的前提下, 深度融合区块链技术和AI, 开发出能够进行复杂决策、预测未来趋势并提供创造性解决方案的智能系统, 将是区块链智能未来发展的重要趋势。其次, ChatGPT、Sora等大模型的发展, 使得智能体节点独立参与区块链网络的治理与决策过程成为可能, 而它们如何与人类社会的伦理、价值和情感等软性需求相结合, 以实现技术和社会的和谐共生, 是未来研究需要关注的重点^[92-94]。最后, AGI与智慧合约执行模式以及TAO组织模式的结合将促使人类决策、组织治理与社会互动的转变, 使得虚拟化、场景化乃至戏剧化的“决策剧场”模式主导未来社会管理^[95], 而如何让区块链智能在这场变革中扮演有效基础设施的角色亟待探究。

参考文献:

- [1] LI J J, YUAN Y, WANG F Y. A novel GSP auction mechanism for ranking Bitcoin transactions in blockchain mining[J]. *Decision Support Systems*, 2019, 124: 113094.
- [2] LI J J, NI X C, YUAN Y, et al. A novel GSP auction mechanism for dynamic confirmation games on Bitcoin transactions[J]. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2022, 15(3): 1436-1447.
- [3] QIN R, DING W W, LI J J, et al. Web3-based decentralized autonomous organizations and operations: architectures, models, and mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53: 2073-2082.
- [4] 李娟娟, 秦蕊, 丁文文, 等. 基于Web3的去中心化自治组织与运营新框架[J]. *自动化学报*, 2023, 49(5): 985-998.
LI J J, QIN R, DING W W, et al. A new framework for Web3-powered decentralized autonomous organizations and operations[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(5): 985-998.
- [5] LI J J, LIANG X L, QIN R, et al. From DAO to TAO: finding the essence of decentralization[C]//*IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. [S.l.:s.n.], 2023: 4283-4288.
- [6] LI J J, WANG F Y. The TAO of blockchain intelligence for intelligent Web3.0[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(12): 2183-2186.
- [7] WANG F Y. The generalized Gödel theorem and blockchain intelligence: in math we can't trust[C]//*The Conference of Blockchain and Mathematics*. [S.l.:s.n.], 2018.
- [8] MARWALA T, XING B. Blockchain and artificial intelligence[EB]. arXiv preprint, 2019, arXiv: 1802.04451.
- [9] HUSSAIN A A, AL-TURJMAN F. Artificial intelligence and blockchain: a review[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2021, 32(9): e4268.
- [10] LIU C H, LIN Q X, WEN S L. Blockchain-enabled data collection and sharing for industrial IoT with deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3516-3526.
- [11] WANG G, LI J J, WANG X, et al. Blockchain-based crypto management for reliable real-time decision-making[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2023, 10(6): 3333-3342.
- [12] KRITTANAWONG C, ROGERS A J, AYDAR M, et al. Integrating blockchain technology with artificial intelligence for cardiovascular medicine[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2020, 17(1): 1-3.
- [13] GUO S Y, ZHANG F, GUO S, et al. Blockchain-assisted privacy-preserving data computing architecture for Web3[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2023, 61(8): 28-34.
- [14] LIN Y J, GAO Z P, DU H Y, et al. A unified blockchain-semantic framework for wireless edge intelligence enabled Web 3.0[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, doi: 10.1109/MWC.018.2200568.
- [15] AGARWAL A, DAHLEH M, SARKAR T. A marketplace for data: an algorithmic solution[C]//*Proceedings of the 2019 ACM Conference on Economics and Computation*. [S.l.:s.n.], 2019: 701-726.
- [16] LU Y L, HUANG X H, ZHANG K, et al. Blockchain and federated learning for 5G beyond[J]. *IEEE Network*, 2021, 35(1): 219-225.
- [17] LIU Y, WANG H S, PENG M G, et al. An incentive mechanism for privacy-preserving crowdsensing via deep reinforcement learning[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(10): 8616-8631.
- [18] DU H Y, WANG J C, NIYATO D, et al. AI-generated incentive mechanism and full-duplex semantic communications for information sharing[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2023, 41(9): 2981-2997.
- [19] HE D J, WU R, LI X J, et al. Detection of vulnerabilities of blockchain smart contracts[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(14): 12178-12185.
- [20] ZHUANG Y, LIU Z G, QIAN P, et al. Smart contract vulnerability detection using graph neural network[C]//*Proceedings of the 29th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. California: International Joint Conferences on Artificial Intelligence Organization, 2020: 3283-3290.
- [21] GAO Z P. When deep learning meets smart contracts[C]//*Proceedings of the 35th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*. New York: ACM, 2020: 1400-1402.
- [22] TANG X, LAN X Q, LI L X, et al. Incentivizing proof-of-stake blockchain for secured data collection in UAV-assisted IoT: a multi-agent reinforcement learning approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(12): 3470-3484.
- [23] BRAVO-MARQUEZ F, REEVES S, UGARTE M. Proof-of-learning: a blockchain consensus mechanism based on machine learning competitions[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Decentralized Applications and Infrastructures (DAPPCON)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 119-124.
- [24] KOSTER R, BALAGUER J, TACCHETTI A, et al. Human-centred

- mechanism design with Democratic AI[J]. *Nature Human Behaviour*, 2022, 6(10): 1398-1407.
- [25] WANG X F, REN X X, QIU C, et al. Integrating edge intelligence and blockchain: what, why, and how[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(4): 2193-2229.
- [26] ZHAO J, ZHU X H, WANG J Z, et al. Efficient client contribution evaluation for horizontal federated learning[C]//*Proceedings of the ICASSP 2021-2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 3060-3064.
- [27] WU J J, LIU J L, CHEN W L, et al. Detecting mixing services via mining Bitcoin transaction network with hybrid motifs[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(4): 2237-2249.
- [28] CHEN L, PENG J Y, LIU Y, et al. Phishing scams detection in ethereum transaction network[J]. *ACM Transactions on Internet Technology*, 2020, 21(1): 1-16.
- [29] ZHENG P L, ZHENG Z B, CHEN L. Selecting reliable blockchain peers via hybrid blockchain reliability prediction[J]. *IET Software*, 2023, 17(4): 362-377.
- [30] LIU Y M, YU F R, LI X, et al. Blockchain and machine learning for communications and networking systems[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 1392-1431.
- [31] WU J J, YUAN Q, LIN D, et al. Who are the phishers? phishing scam detection on ethereum via network embedding[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2022, 52(2): 1156-1166.
- [32] GUO F X, YU F R, ZHANG H L, et al. Adaptive resource allocation in future wireless networks with blockchain and mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(3): 1689-1703.
- [33] BURGGRAF T. Beyond risk parity – a machine learning-based hierarchical risk parity approach on cryptocurrencies[J]. *Finance Research Letters*, 2021, 38: 101523.
- [34] ZHOU J J, HU C K, CHI J L, et al. Behavior-aware account de-anonymization on ethereum interaction graph[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2022, 17: 3433-3448.
- [35] 林知微, 张嵩川, 王成吉, 等. 区块链技术综述: 在下一代智能制造中的应用[J]. *智能科学与技术学报*, 2023, 5(2): 200-211.
- LIN Z W, ZHANG S C, WANG C J, et al. A survey on application of block chain in next generation intelligent manufacturing[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2023, 5(2): 200-211.
- [36] MAXMEN A. AI researchers embrace Bitcoin technology to share medical data[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 293-294.
- [37] ABADI M, CHU A, GOODFELLOW I, et al. Deep learning with differential privacy[C]//*Proceedings of the 2016 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. New York: ACM, 2016: 308-318.
- [38] DRAKATOS P, DEMETRIOU E, KOUMOU S, et al. Triastore: a web 3.0 blockchain datastore for massive IoT workloads[C]//*Proceedings of the 2021 22nd IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 187-192.
- [39] SHEN M, TANG X Y, ZHU L H, et al. Privacy-preserving support vector machine training over blockchain-based encrypted IoT data in smart cities[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 7702-7712.
- [40] LI J J, LI J Q, WANG X, et al. Multi-blockchain based data trading markets with novel pricing mechanisms[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(12): 2222-2232.
- [41] 李娟娟, 王戈, 王晓, 等. 加密管理: 一种基于区块链的新型组织管理模式[J]. *智能科学与技术学报*, 2022, 4(2): 145-156.
- LI J J, WANG G, WANG X, et al. Crypto management: a novel organizational management model based on blockchain[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2022, 4(2): 145-156.
- [42] FAN S Z, ZHANG H B, ZENG Y C, et al. Hybrid blockchain-based resource trading system for federated learning in edge computing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(4): 2252-2264.
- [43] DU Y, WANG Z, LI J, et al. Blockchain-aided edge computing market: smart contract and consensus mechanisms[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2023, 22(6): 3193-3208.
- [44] OUYANG L W, YUAN Y, WANG F Y. Learning markets: an AI collaboration framework based on blockchain and smart contracts[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(16): 14273-14286.
- [45] REN Y Z, XIE R C, YU F R, et al. NFT-based intelligence networking for connected and autonomous vehicles: a quantum reinforcement learning approach[J]. *IEEE Network*, 2022, 36(6): 116-124.
- [46] TENG S Y, HU X M, DENG P, et al. Motion planning for autonomous driving: the state of the art and future perspectives[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(6): 3692-3711.
- [47] MONTES G A, GOERTZEL B. Distributed, decentralized, and democratized artificial intelligence[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2019, 141: 354-358.
- [48] JOGUNOLA O, ADEBISI B, IKPEHAI A, et al. Consensus algorithms and deep reinforcement learning in energy market: a review[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(6): 4211-4227.
- [49] CUI L Z, SU X X, MING Z X, et al. CREAT: blockchain-assisted compression algorithm of federated learning for content caching in edge computing[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(16): 14151-14161.
- [50] KANG J W, LI X D, NIE J T, et al. Communication-efficient and cross-chain empowered federated learning for artificial intelligence of things[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2022, 9(5): 2966-2977.
- [51] KANG J W, XIONG Z H, NIYATO D, et al. Incentive mechanism for reliable federated learning: a joint optimization approach to combining reputation and contract theory[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(6): 10700-10714.
- [52] FU Y C, LI C L, YU F R, LUAN T H, ZHAO P C. An incentive mechanism of incorporating supervision game for federated learning in autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(12): 14800-14812.
- FU Y C, LI C L, YU F R, et al. An incentive mechanism of incorporating supervision game for federated learning in autonomous driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(12): 14800-14812.
- [53] JIANG C, XU C, ZHANG Y. PFLM: privacy-preserving federated learning with membership proof[J]. *Information Sciences*, 2021, 576: 288-311.
- [54] WANG L L, ZHAO X Q, LU Z K, et al. Enhancing privacy preservation and trustworthiness for decentralized federated learning[J]. *Information Sciences*, 2023, 628: 449-468.
- [55] SAI S, HASSIJA V, CHAMOLA V, et al. Federated learning and NFT-based privacy-preserving medical-data-sharing scheme for intelligent diagnosis in smart healthcare[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(4): 5568-5577.
- [56] LANG P, TIAN D X, DUAN X T, et al. Blockchain-based cooperative computation offloading and secure handover in vehicular edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(7):

- 3839-3853.
- [57] ZHANG W S, SUN G, XU L, et al. A trustworthy safety inspection framework using performance-security balanced blockchain[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(11): 8178-8190.
 - [58] ZHU Z Q, WANG X, ZHAO Y, et al. Crowdsensing intelligence by decentralized autonomous vehicles organizations and operations[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2022, 7(4): 804-808.
 - [59] LI T, FANG Y Z, LU Y, et al. SmartVM: a smart contract virtual machine for fast on-chain DNN computations[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2022, 33(12): 4100-4116.
 - [60] SAMI H, MIZOUNI R, OTROK H, et al. LearnChain: transparent and cooperative reinforcement learning on blockchain[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2024, 150: 255-271.
 - [61] KAREEM A, AHMED E, MOHAMED M. Decentralizing construction AI applications using blockchain technology[J]. *Expert Systems With Applications*, 2022, 194: 116548.
 - [62] CASTELLÓFERRER E, ARAI K, BHATIA R, et al. The blockchain: a new framework for robotic swarm systems[C]// *Proceedings of the Future Technologies Conference 2018*. [S.l.:s.n.], 2019: 1037-1058.
 - [63] XUE X, LI G D, ZHOU D Y, et al. Research roadmap of service ecosystems: a crowd intelligence perspective[J]. *International Journal of Crowd Science*, 2022, 6(4): 195-222.
 - [64] MA Z F, WANG X C, JAIN D K, et al. A blockchain-based trusted data management scheme in edge computing[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 2013-2021.
 - [65] WANG F Y, QIN R, WANG X, et al. MetaSocieties in metaverse: MetaEconomics and MetaManagement for MetaEnterprises and MetaCities[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, 9(1): 2-7.
 - [66] WANG X X, CHENG X, LU J W, et al. Metaverses-based parallel oil fields in CPSS: a framework and methodology[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2138-2147.
 - [67] YANG D S, LI Q, ZHU F H, et al. Parallel emergency management of incidents by integrating OODA and PREA loops: the C2 mechanism and modes[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2160-2172.
 - [68] XUE X, CHEN F Y, ZHOU D Y, et al. Computational experiments for complex social systems—Part I: the customization of computational model[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2022, 9(5): 1330-1344.
 - [69] XUE X, SHEN Y F, YU X N, et al. Computational experiments: a new analysis method for cyber-physical-social systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, 54(2): 813-826.
 - [70] CHEN J C, ZHANG Y K, TENG S Y, et al. ACP-based energy-efficient schemes for sustainable intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(5): 3224-3227.
 - [71] WANG J C, TANG Y, HARE R, et al. Parallel intelligent education with ChatGPT[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2024, 25(1): 12-18.
 - [72] QIN R, YUAN Y, WANG F Y. Blockchain-based knowledge automation for CPSS-oriented parallel management[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2020, 7(5): 1180-1188.
 - [73] WANG J G, TIAN Y L, WANG Y T, et al. A framework and operational procedures for metaverses-based industrial foundation models[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2037-2046.
 - [74] YANG J, LI S M, WANG X X, et al. DeFACT in ManuVerse for parallel manufacturing: foundation models and parallel workers in smart factories[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2188-2199.
 - [75] TIAN Y L, LI X, ZHANG H, et al. VistaGPT: generative parallel transformers for vehicles with intelligent systems for transport automation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(9): 4198-4207.
 - [76] LI X, TIAN Y L, YE P J, et al. A novel scenarios engineering methodology for foundation models in metaverse[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2148-2159.
 - [77] HAN J P, YANG M Z, CHEN X G, et al. ParaDefender: a scenario-driven parallel system for defending metaverses[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(4): 2118-2127.
 - [78] LI J J, QIN R, WANG F Y. The future of management: DAO to smart organizations and intelligent operations[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(6): 3389-3399.
 - [79] LI J J, QIN R, OLAVERRI-MONREAL C, et al. Logistics 5.0: from intelligent networks to sustainable ecosystems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(7): 3771-3774.
 - [80] QIN R, LI J J, LIANG X L, et al. Management-oriented operating systems: harnessing the power of DAOs and foundation models[C]// *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 3180-3185.
 - [81] LI J J, YUAN Y, WANG F Y. Analyzing Bitcoin transaction fees using a queueing game model[J]. *Electronic Commerce Research*, 2022, 22(1): 135-155.
 - [82] OUYANG L W, ZHANG W W, WANG F Y. Intelligent contracts: making smart contracts smart for blockchain intelligence[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, 104: 108421.
 - [83] WANG Y T, WANG X, WANG X X, et al. The ChatGPT after: building knowledge factories for knowledge workers with knowledge automation[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(11): 2041-2044.
 - [84] DING W W, LIANG X L, HOU J C, et al. A novel approach for predictable governance of decentralized autonomous organizations based on parallel intelligence[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(5): 3092-3103.
 - [85] WANG G, QIN R, LI J J, et al. A novel DAO-based parallel enterprise management framework in Web3 era[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2024, 11(1): 839-848.
 - [86] 王飞跃. 平行管理: 复杂性管理智能的生态科技与智慧管理之DAO[J]. *自动化学报*, 2022, 48(11): 2655-2669.
 - WANG F Y. Parallel management: the DAO to smart ecological technology for complexity management intelligence[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(11): 2655-2669.
 - [87] 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, 53(9): 5321-5330.
 - [88] WANG F Y. Parallel economics: a new supply-demand philosophy via parallel organizations and parallel management[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2020, 7(4): 840-848.
 - [89] LIN Y L, NA X X, WANG D, et al. Mobility 5.0: smart logistics and transportation services in cyber-physical-social systems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(6): 3527-3532.
 - [90] CHEN Y Y, ZHANG H, WANG F Y. Society-centered and DAO-powered sustainability in transportation 5.0: an intelligent vehicles perspective[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(4): 2635-2638.
 - [91] WANG X X, YANG J, WANG Y T, et al. Steps toward industry 5.0: building “6S” parallel industries with cyber-physical-social intelligence[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2023, 10(8): 1692-1703.

- [92] LI J J, QIN R, GUAN S T, et al. Digital CEOs in digital enterprises: automating, augmenting, and parallel in metaverse/CPSS/TAOs[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(4): 820-823.
- [93] WANG F Y, MIAO Q H, LI L X, et al. When does sora show: the beginning of TAO to imaginative intelligence and scenarios engineering[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2024, 11(4): 809-815.
- [94] QIN R, WANG F Y, ZHENG X L, et al. Sora for computational social systems: From counterfactual experiments to artificiofactual experiments[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2024, 11(2): 1529-1548.
- [95] 倪清桦, 郭超, 王飞跃. 平行戏剧: 新时代戏剧的人机协同创作与智能管理[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 436-445.
- NI Q H, GUO C, WANG F Y. Parallel theaters: human-machine collaborative creation and intelligent management for theatrical art[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(4): 436-445.

[作者简介]



李娟娟 (1986-), 女, 博士, 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室副研究员, 主要研究方向为区块链智能、Web 3.0与平行管理。



管桑田 (1997-), 男, 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室研究助理, 主要研究方向为去中心化经济、Web 3.0与平行管理。



秦蕊 (1983-), 女, 博士, 中国科学院自动化研究所多模态人工智能系统全国重点实验室副研究员, 主要研究方向为区块链智能、DAO与平行管理。



侯家琛 (1986-), 男, 澳门科技大学创新工程学院博士生, 主要研究方向为DAO、智能交通以及分布式管理。



王飞跃 (1961-), 男, 博士, 中国科学院自动化研究所研究员, 复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 澳门科技大学特聘教授, 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。