

边缘智能融合区块链：研究现状、应用及挑战

任晓旭¹, 仇超¹, 邓辉², 戴子明¹, 刘泽军¹, 王晓飞¹

1. 天津大学智能与计算学部, 天津 300350;
2. 雄安国创中心科技有限公司, 河北 保定 071000

基金项目: 国家自然科学基金项目(62072332, 62002260); 中国博士后科学基金项目(2020M670654); 天津新创海河实验室资助项目(22HHXCJC00002); 广东省人工智能与数字经济实验室研究基金(GML-KF-22-03)

通信作者: 王晓飞, xiaofeiwang@tju.edu.cn 收稿/录用/修回: 2023-06-26/2023-09-04/2023-11-20

摘要

边缘智能集网络、计算、存储和智能于一体, 将智能推向网络边缘, 为互联时代的低延迟关键计算开辟了道路。为进一步满足万物互联下的敏捷连接、数据优化、实时边缘业务处理、安全和隐私保护等关键需求, 区块链存在着加速边缘智能的巨大潜力。边缘智能和区块链两种技术相互融合, 优势互补。在此背景下, 本文旨在探讨边缘智能与区块链的关系, 从区块链驱动的边缘智能和边缘智能驱动的区块链两个方面介绍边缘智能融合区块链的最新研究现状, 应用与挑战, 进而为泛在智能服务开辟新的视野。

Integrating Edge Intelligence and Blockchain: Research Actualities, Applications and Challenges

REN Xiaoxu¹, QIU Chao¹, DENG Hui², DAI Ziming¹, LIU Zejun¹, WANG Xiaofei¹

1. College of Intelligence and Computing, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2. Xiongan Guochuang Center Technology Co., Ltd., Baoding 071000, China

Abstract

Edge intelligence, which comprises networking, computing, storage, and intelligence, pushes intelligence to the edge of the network and opens the way for low-latency critical computing in the Internet of Everything era. To further meet the critical needs of elastic connectivity, data optimization, real-time edge business processing, security, and privacy protection under the Internet of Everything, blockchain has great potential to accelerate edge intelligence. The integration of edge intelligence and blockchain has complementary advantages. In this context, we explore the relationship between edge intelligence and blockchain, introduce the most recent research, applications, and challenges in terms of blockchain-driven edge intelligence and edge intelligence-driven blockchain, and broaden the horizon for ubiquitous intelligent services.

0 引言

随着信息化技术浪潮的出现, 人工智能(*artificial intelligence, AI*)蓬勃发展, 数据规模激增。根

据爱立信预测^[1], 到 2024 年, 物联网(*Internet of Things, IoT*)设备将产生 45% 的 40 ZB 互联网数据。然而, 将庞大的数据传输到云数据中心需要高带宽和强计算资源^[2-3], 这对网络传输能力、基础设施

关键词

边缘智能

区块链

隐私安全

可伸缩性

中图法分类号: TP393.0

文献标志码: A

Keywords

edge intelligence;

blockchain;

privacy and security;

scalability

的算力等提出了更高的要求。边缘智能结合边缘计算和 AI, 将 AI 应用从传统的云端延伸到网络边缘的过程, 为低延迟和关键计算开辟道路^[4-6]。具体地, 边缘智能是一种融合网络、计算、存储和 AI 的新兴范式, 满足互联网时代在敏捷连接、实时业务、数据优化、应用智能、安全和隐私保护等方面的关键需求, 并同时应用到众多领域, 例如物联网^[7]、智能城市^[8]和智能家居^[9]等。

目前关于边缘智能还没有一个标准的定义。2019 年, 国际电工委员会将边缘智能定义为在边缘使用机器学习 (machine learning, ML) 算法进行数据采集、存储、分析和聚合的能力^[10]。文[11]中的工作并未将边缘智能限制在边缘服务器或设备上, 而是将边缘智能视为一个从云端卸载深度学习的训练和推理的平台。此外, 还有一些工作根据 AI 与边缘环境的相关性对边缘智能进行了划分^[12-13]。然而, 边缘智能跨设备协作导致异构计算管理效率低、数据协作和模型优化差等问题。为进一步加速边缘智能应用的大规模实施, 需要解决以下挑战:

- 如何高效且安全地管理分散的算力资源, 同时向资源受限的计算平台提供灵活的算力服务。
- 如何连接地理上分布的边缘节点以协作处理密集的分布式数据。
- 如何基于私有数据样本安全地执行分布式训练和推理。

区块链作为比特币的底层技术和核心架构^[14], 可以视为弥补边缘智能局限性的互补性技术。区块链拥有独特的技术特征, 如共识协议、密码算法、分布式账本技术等, 使得计算范式实现了从集中管理到分布式管理的转变^[15], 可以无需第三方认证记录多方交易。区块链可以降低可信第三方的成本、提高资源管理效率、验证数据真实性、保护隐私和确保安全性^[16-17]。然而, 区块链在驱动边缘智能时也面临许多技术挑战, 例如存储负载、事务容量、可扩展性和容错性等^[18-19]。

目前, 已经有许多关于边缘智能融合区块链的相关工作。文[20]讨论了区块链与 5G 网络及其他网络的协同作用, 并分析了区块链赋能多样化 5G 服务的一些关键技术, 包括云计算、边缘计算、网络切片等。文[21]提出了区块链和物联网的集成系统。该系统旨在建立去中心化的管理架构, 提高数据隐私性和系统安全性, 显著降低系统实现的复杂度, 从而服务于更多的应用场景。此外, 文[22]将区块链和边缘计算结合, 以安全地支持大规模网

络服务器、数据存储和边缘终端的有效性计算。随着 AI 技术的突破, 一些由区块链辅助的去中心化 AI 算法引起了极大的关注^[23-25]。在联邦学习(federated learning, FL)的驱动下, 文[23]对如何利用区块链促进 AI 应用进行了全面的调查。此外, NGUYEN 等研究了区块链和 AI 的融合应用^[24]。文[25]研究了区块链和 ML 在通信和网络系统中的融合, 其可以提高 ML 在数据和模型共享、分布式智能等方面性能, 并且可以增强区块链在可扩展性、安全性、隐私性等方面的功能。

区块链构建了一个分布式点对点的系统, 作为一种安全可验证的分散确认事务的机制, 广泛应用于金融经济、物联网、大数据、云计算和边缘计算领域。在无人驾驶等高动态、超低延时、资源受限、数据与计算解耦的边缘网络应用场景下, 跨域可信、隐私保护、入侵监测、细粒度激励等需求对区块链研究提出了进一步的挑战。关注到人工智能向边缘网络下放的趋势, 本文讨论了区块链在新兴的边缘人工智能计算领域的应用。首先介绍了区块链技术的基础架构, 概述了相关研究和应用方向; 接着从边缘人工智能计算的概念与兴起出发, 详细分析并讨论了区块链技术在面向边缘人工智能计算领域的应用需求, 包括相关研究综述、应用趋势和未来研究方向。此外, 还总结了区块链技术应用在边缘人工智能计算方面的优势和未来仍需关注的问题。

然而, 大多数现有研究存在以下局限性: 1) 目前将 AI、边缘计算与区块链技术融合的研究工作较少; 2) 缺乏上述技术融合交互的通用模型; 3) 缺少系统部署与实施教程。与上述工作不同, 本文重点关注边缘智能和区块链的集成融合, 同时开发了一些通用模型, 以帮助读者在集成系统中构建相关的优化模型, 并提供了详细的实施教程。

边缘智能和区块链的优势互补, 它们的融合有望在安全、隐私、去中心化方面提供一套创新解决方案, 并改变网络管理架构。具体地工作如下: 第一, 本文概述边缘智能和区块链的基本原理, 同时通过利用区块链的互补特点支持边缘智能。第二, 本文将边缘智能部署分为 3 个方面, 包括算力资源管理、数据管理和模型优化。第三, 本文改善区块链以更好地支持边缘智能, 包括灵活的共识协议、高效的激励机制、更智能的智能合约和可扩展的区块链系统。第四, 本文展示了一些区块链驱动的边缘智能应用, 并给出了实施部署教程。最后, 本文

提出了一些关键的研究挑战与潜在的解决方案。

1 区块链驱动的边缘智能

在本节中, 将从算力资源管理、数据管理和模型优化 3 个方面探究如何使区块链驱动边缘智能。

1.1 基于区块链的边缘智能算力管理

算力资源海量异构, 服务管理性能低效。基于区块链的边缘智能能够管理异构的分布式算力资源, 为上述问题提供了可行的解决方案。

1.1.1 价值驱动的算力资源共享

区块链用于激励计算节点共享其算力资源, 同时避免交易隐私的泄露^[26]。如图 1 所示, 先前的工作主要集中在设计激励机制, 使算力用户从算力供应商租用算力资源来运行移动区块链。基于博弈或拍卖方法可以优化算力供应商和算力用户的交易策略, 以实现价值驱动的算力资源共享。

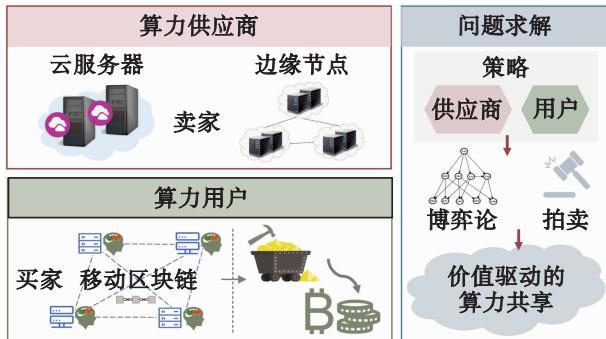


图 1 基于区块链的价值驱动算力共享

Fig.1 The value-driven computing-power sharing based blockchain

基于博弈的方法 目前, 已经有一些关于算力共享的博弈论和定价模型研究工作^[27]。一般来说, 算力供应商和算力用户都是自私的, 只关注自身的效用。

在文[28]中, 算力供应商效用是由算力用户获得金额减去执行任务的能源成本得出的, 而算力用户的效用是由实现服务需求的回报减去资源付费得出。该工作将算力供应商和算力用户间的区块链网络资源管理建模为斯塔克尔伯格博弈。通过多智能体强化学习算法获得算网成员价值最大化的近最优策略。由于每个矿工的哈希率决策是未知和不可观测的, 文[29]的作者通过部分可观测的马尔可夫决策过程对矿工的决策进行了建模。此外, 为了降低模型的复杂性, 文[30]基于贝叶斯神经网络对区块链驱动的边缘智能系统中的不确定性进行建模, 减少不可

观测状态空间的大小, 从而降低学习算法的复杂性。

基于拍卖的方法 拍卖是一种价值驱动的算力资源共享解决方案。

通过拍卖机制, 基于区块链的算力资源交易系统可以使算力供应商和用户安全、公平地共享算力资源^[31]。文[32]考虑了用户任务期限感知, 提出了基于拍卖的任务资源匹配策略, 同时基于智能合约实现了任务与边缘服务器的自动匹配。此外, 文[33]引入了深度学习(deep learning, DL)最优拍卖机制, 并基于该机制构建了精确匹配最优拍卖的神经网络架构, 实现最优投标策略。具体地, 该策略利用单调变换函数确定神经网络体系结构的分配和支付规则, 确保个体理性和主导策略激励兼容性。

1.1.2 性能驱动的算力分配

算力分配的关键挑战之一是如何提高系统性能。

最近, 已经有一些研究工作致力于基于区块链改进资源分配的适应性^[34-36]。YU 等^[34]利用区块链来保证边缘网络的高效资源协作和可靠缓存。FU 等^[35]利用共识协议来确保网络范围内的视图在各种边缘智能系统中同步和收集。文[36]将自适应资源分配的性能定义为用户的延迟、区块链的吞吐量、最终时间、去中心化和安全性。

通过联合考虑任务缓存、计算和区块链系统效率, 文[37]提出了新的资源分配框架, 以减少不必要的延迟, 同时提高边缘设备间通信的缓存效率和系统安全性。文[38]基于区块链提出了针对车联网场景中停放车辆辅助计算的系统模型。该模型综合考虑了服务器计算资源、车辆机动性等因素, 利用深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)优化计算卸载和资源分配策略, 进而减少系统能耗和数据传输时延。文[39]引入联盟链和 DRL 建立可信和自动调整服务功能链编排架构。基于联盟链, 将选择共识和轻节点, 同时进行资源注册、认证, 以确保可靠和自主的资源分配。

1.2 基于区块链的边缘智能数据管理

区块链驱动的数据管理体现在数据交易激励策略、数据缓存策略和可靠的数据协作方面, 如图 2 所示。总的来说, 上述 3 个模块协同工作, 从激励、实时和安全三个方面提高了边缘数据管理的效率。

1.2.1 数据交易激励策略

目前的一些研究主要关注如何通过 AI 算法共享边缘数据和合作, 而忽略了如何激励更多设备贡献数据^[40]。

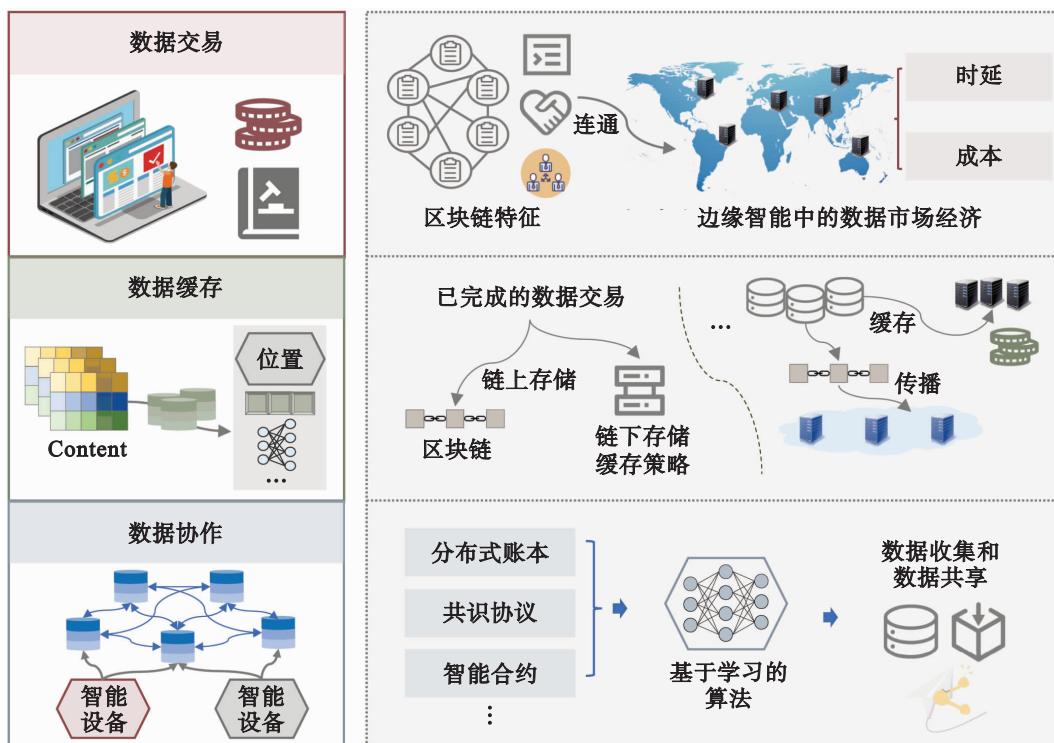


图 2 基于区块链的边缘智能数据管理

Fig.2 The data administration of blockchain-based edge intelligence

区块链带来的一些特殊属性可以在没有第三方中介的情况下实现数据价值的交换和共享,如图 2 的上层所示。此外,区块链能够以分布式点对点方式实现数据共享货币化,进一步确保边缘智能系统的效率。此外,特定的共识协议和智能合约可以降低交易验证延迟和资源消耗成本,提高交易效率,加快交易过程中的资金周转。

在频繁进行数据交易的场景中,如车联网(*internet of vehicles*, IoV),由于交易验证延迟和高计算消耗,请求数据的设备通常没有足够的代币来立即执行下一笔交易。交易证明协议^[41],综合考虑高功率节点的市场利益和资源消耗,可以消除上述漏洞。

激励机制可以在向矿工分配相应奖励的同时释放代币,激励更多的边缘智能设备贡献数据,并确保公平。针对区块链赋能车联网系统,数据共享激励博弈模型被建立,以此实现区块链用户和矿工的个人利润最大化^[42]。同时基于多智能体强化学习算法可以用于寻找利益博弈均衡。与代币激励不同,基于 Shapley 的解决方案是一种激励边缘智能设备积极参与数据共享的新尝试^[43]。

1.2.2 数据缓存策略

数据缓存提供了一体化的解决方案,可以有效

地减少回程链路上的移动流量。如图 2 的中间层所示。在区块链的帮助下,已经完成的数据交易可以在交易验证后记录到区块中,解决了数据缓存中的不可信问题。存储数据后,链下数据存储策略快速生成匿名数据集,提高了数据管理的效率,帮助用户快速收集和查询数据^[44]。

此外,共识机制可以使数据缓存得更快、更高效^[45]。效用证明共识集成了区块链和数据缓存^[46]。边缘智能设备通过接收区块链发送的广播信息来下载缓存的内容^[47]。同时,结合 ML 或 DL 方法向相关边缘智能设备推荐和广播数据,进一步提高了数据缓存的命中率和鲁棒性。此外,智能合约支持可信的数据交付交易^[48]。

1.2.3 数据协作策略

基于区块链对边缘智能的安全数据协作问题提供了新的解决方案,如图 2 的下层所示。

区块链在边缘智能节点之间同步和广播交易的根哈希值,从而支持数据注册,同时保证数据的一致性和所有权。DRL 算法的引入有助于建立一种高效的数据收集和共享方案,其中完全分布的 DRL 方案用于数据收集^[49]。同时,在 ML 的帮助下,边缘智能数据集可以在链上进行处理^[50],解决了数据重复、数据值丢失、错误和中断等问题。

共识机制保证审计和记录数据共享中的节点交互, 从而支持多方激励和隐私保护^[51]。同时, 智能合约可以更灵活地实施数据协作策略, 进而实现边缘智能节点之间的可信价值交换。文[52]基于区块链和边缘计算提出了一种群智感知系统, 该系统利用轻量级声誉更新方案聚合感知数据, 抵抗恶意用户的同时, 也保护了数据隐私。

1.3 边缘智能中区块链驱动的模型优化

众多研究学者基于区块链解决边缘智能中的低效训练和推理问题。

1.3.1 高效率训练机制

学习算法的高效率指的是为边缘服务器提供激励和安全保证, 以提高训练性能。区块链中的区块奖励可以激励分布式边缘设备交换和验证本地模型

更新, 流程如图3所示。

具体来说, 基于区块链的FL算法可以通过提供与训练样本量成比例的奖励来促进拥有更多训练样本的边缘设备之间的协作^[53]。然而, 其并不能阻止参与训练客户端的一些恶意行为。

因此, 具有契约理论的声誉机制被提出^[54]。这种机制激励高准确度和可靠的本地训练数据的高声誉工作者加入到学习过程中, 提高学习模型的准确度。文[55]提出了针对工业物联网的区块链联邦学习系统架构。该架构中的边缘服务器管理一个完整的区块链节点, 并且会为区块链节点定期创建一个默克尔树, 以此记录数据并且维护数据完整性。同时, 该架构设计了链上激励机制来计算节点贡献, 以提高模型训练的精确性。

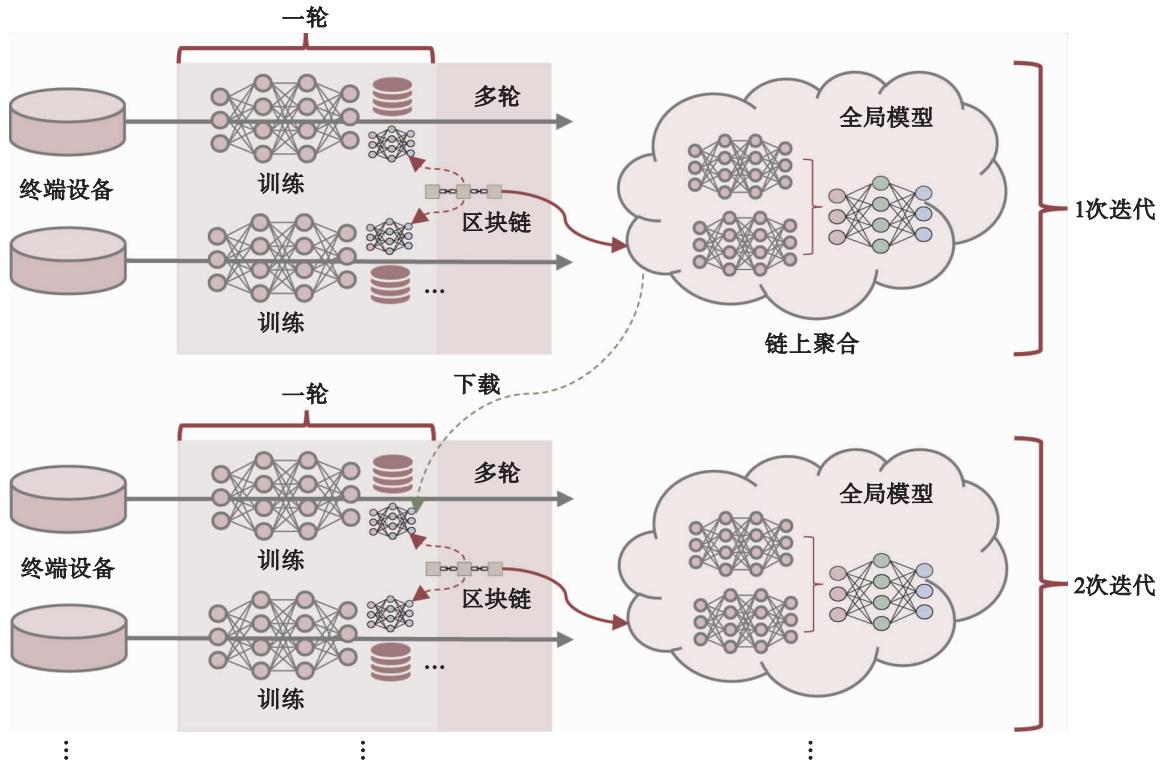


图3 区块链驱动的FL模型
Fig.3 The blockchain-driven FL model

1.3.2 可信任推理机制

区块链具有完整性和隐私性的特点, 可以解决协作推理的信任问题。

一方面, 边缘协作推理可以表述为协作知识图的构建^[56]。具体来说, 知识图谱通过对语义实体和属性进行建模促进了学习模型的推理性能。同时, 知识量证明共识根据知识贡献来选择领导者, 这在减少流量负载和计算开销的同时, 也降低了恶意节点的风险。

另一方面, 归纳法被用于推断某些事实和假设^[57], 而知识库可以被视为推理引擎, 选择相应的规则并应用于边缘智能框架的协作推理, 可以实现智能在可视化边缘应用中的可解释性和稳健性。

2 边缘智能驱动的区块链

在本节中, 将从弹性灵活的共识协议、高效安全的激励机制、更智能的智能合约和可扩展性等四个方面探究如何使边缘智能驱动区块链。

2.1 弹性灵活的共识协议

目前部署在区块链中的共识协议面临冗余性、不兼容及安全性等问题。近年来,针对上述问题开展了众多的研究工作。

2.1.1 多功能共识协议设计

许多研究人员通过引入多功能共识协议来设计一个轻量级的区块链系统。为了提升传统有向无环图式区块链模型中查找特定数据哈希的速度,提出了面向边缘计算的多层次区块链网络模型。该模型将查找特定数据哈希的速度提高了4~7倍^[58]。同时,文[58]设计了自适应工作量证明算法,根据终

端节点的行为动态调整算法的执行难度,对比传统工作量证明算法可以将交易效率提高4~5倍。

一些共识协议用DL训练代替了费力而无意义的哈希计算,使区块链能够在边缘之间分享更先进的智能。这里给出了该多功能协议的一般设计架构,如图4所示。

基于深度学习量证明:在基于该共识的区块链中,存在着一个模型请求者、矿工和全节点^[59]。模型请求者将DL模型训练外包给矿工,然后矿工从事DL训练任务,全节点则在测试数据集上验证训练模型。

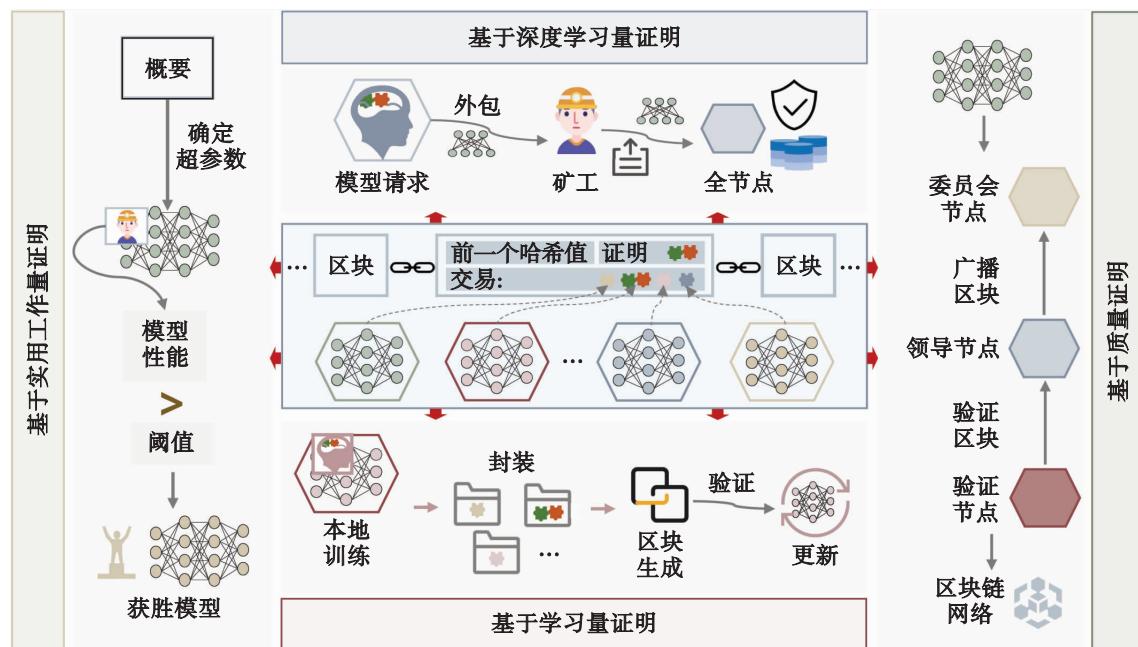


图4 多功能共识协议的分类图

Fig.4 The taxonomy graph of multi-functional consensus protocols

基于学习量证明 该共识首先在本地训练神经网络(neural network, NN),然后将每个节点的本地学习模型封装成交易^[60]。只有赢家才能发行区块并与其他边达成共识。一旦产生一个区块,其他节点会验证该区块并最终更新它们的本地智能。

基于实用工作量证明 该共识包含交易列表、只使用一次的随机数和前一个区块的哈希值的摘要将在有用工作证明中被哈希化,而获得的哈希值随后将确定训练好的DL模型的超参数^[61]。之后,一旦矿工的DL性能超过一个给定的阈值,矿工将获胜。

基于质量证明 该共识将FL整合到区块链的共识过程中,促进了计算资源的利用,同时提高了FL算法的性能^[62]。

2.1.2 共识协议兼容性增强

在区块链驱动的边缘智能中只使用一种共识协议是不合理的。根据实际应用场景,区块链应该兼容多种共识机制,并能灵活选择最合适的共识,以提高区块链的兼容性能。

文[63~64]设计了面向服务的联盟链,并根据用户的服务质量(quality of service, QoS)要求提出几个共识协议。其次,共识协议与区块生产者选择和带宽分配可以被表述为马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP)。上述MDP可以通过DRL算法解决,以实现面向服务的区块链DRL算法可以针对不同用户的QoS要求更快地选择协议的策略,同时提高系统运行的兼容性能,使区块链更适合边缘场景。

2.2 高效安全的激励机制

现有的激励机制面临资源浪费及洗钱、庞氏骗局和其他网络犯罪活动。近年来, 已经有一些工作针对以上问题进行了研究。进一步提高了激励机制的效力, 包括挖矿策略优化和防范加密货币的风险。

2.2.1 挖矿策略优化

文[65]考虑提供执行挖矿任务所需的算力资源, 如图5所示, 利用强化学习算法, 通过解决提供商和矿工之间的斯塔克尔伯格博弈, 可以得到资源管理中的最优挖矿策略。文[66]将挖矿任务调度问题建模为MDP, 考虑到所有区块链用户的系统性能和隐私级别的影响^[67], 将任务卸载、用户隐私保护和挖矿收益构建为联合优化问题进行建模。由于系统动态没有先验知识, 因此设计了基于深度强化学习的算法, 以有效解决上述问题, 并提升了大规模区块链场景下的挖矿任务性能。

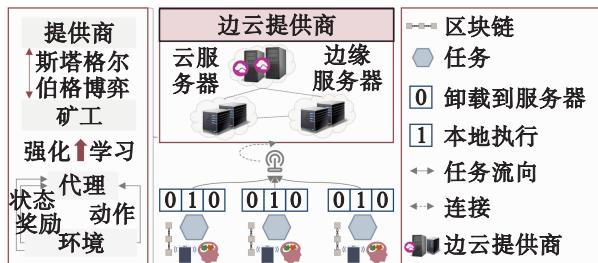


图5 矿工策略优化

Fig.5 The mining strategy optimization

此外, 基于内生智能、泛在连接的6G技术, 文[68]提出了一种智能区块链分片与基于契约理论的激励机制, 该机制可以实现区块链服务请求者的区块收益最大化, 同时保证预算可行性、个体理性和激励相容性。

2.2.2 货币风险预防

由于加密货币具有高度匿名性, 因此被认为是非法活动的首选货币。目前已经提出了许多措施来预防加密货币的风险。

例如, 文[69]提出了一种机器学习检测方法来识别区块链网络中的欺诈交易。然而, 传统的监督算法不适用于标签稀缺的情况。在区块链网络中, 只有少部分终端用户被报告为骗子, 使得监督技术不可行。

因此, 出现了一系列无监督方法, 它们将加密货币地址的去匿名化视为一种聚类问题^[70]。这些无监督方法通过聚类对象和检测角色来定位区块链中的异常行为。为了提高无监督方法的性能, 可以

通过主动学习来获取一些标签, 以实现接近最优监督基准线的性能^[71]。

2.3 更智能的智能合约

智能合约通常由一组可由特定地址识别的执行代码和状态组成。然后矿工负责验证和存储交易到明确的区块中, 以创建一个唯一的合约地址, 供区块链用户调用智能合约。因此, 它允许不同、匿名、边缘方之间的可信交易和协议。尽管区块链带来了更可靠、方便的服务, 但智能合约仍存在智能合约不智能、不健壮等问题。将基于学习的算法扩展到区块链安全管理是一个有前途的解决方案。

2.3.1 智能合约性能提升

当前的智能合约存在潜在的效率问题, 引发了对轻量级区块链系统的严重担忧。本小节旨在研究智能合约的性能提升。

健壮性 由于人为失误, 智能合约可能出现错误。一旦它们在区块链上部署, 通常很难修改。同时, 当智能合约中的代码被重写时, 其性能会急剧下降。因此, 许多研究人员致力于提高智能合约的健壮性。

Eth2Vec^[72]是基于机器学习的静态分析工具, 具有对智能合约代码重写的鲁棒性。该工具可以通过机器学习自动学习特征。因此, 即使代码被重写, Eth2Vec的表现也非常出色。MATRIX^[73]旨在成为新一代区块链, 通过将区块链和人工智能技术结合开发自动生成的智能合约。MATRIX中基于深度神经网络的代码生成器可以自动将包括用户核心元素在内的脚本转换为等效程序。通过这种方式, MATRIX可以提高交易速度并使智能合约更加有效, 进一步支持边缘处的区块链灵活操作。

高效性 尽管智能合约由于其可靠性在各个领域得到了广泛应用, 但其效率仍存在问题, 包括正确性、有效性、灵活性、选择性等。

通过将智能合约、深度机器学习和基于IoT的条件监测相结合, 提出了一种智能物流解决方案^[73]。基于机器学习的方法有效地选择智能合约, 以保证IoT系统可信、可追溯。此外, 机器学习还适用于分析和降低犯罪智能合约的有效性^[74], 此外, 结合Q-learning算法来训练数据反馈参数, 以降低犯罪智能合约的有效性, 大大降低合约的有效性, 进一步防止犯罪行为。

2.3.2 智能合约的威胁检测

与传统软件程序不同, 智能合约代码在部署后无法更改, 给黑客提供了利用潜在问题攻击智能合

约的机会，给区块链的维护带来了挑战。

基于学习的方法是实现安全合约的强有力工具。长短期记忆人工神经网络算法可以增强智能合约的漏洞检测能力，使区块链能够分析和检测缺陷，而无需预定义或专业知识^[75]。

此外，采用基于学习的方法对智能合约进行学习向量表示对于响应攻击者创建的漏洞是非常有利的^[76]。这种基于学习的方法可以检测智能合约已知的一组漏洞，进一步帮助提高用户对智能合约可靠性的信心。智能合约的表示不仅可以语义地相互关联，还可以通过将向量化的表示输入模型，精确地检测漏洞^[77]。

2.4 区块链可扩展性提升

区块链系统的主要性能瓶颈是由区块数据的广播延迟引起的，这实质上受到互联网带宽和通信延迟的限制，直接降低了区块链系统的兼容性并限制了其可扩展性。具体而言，可扩展性是阻止区块链成为边缘智能通用平台的关键障碍。目前，可扩展性问题的现有解决方案只关注在以牺牲其他性能来提高可扩展性上，如去中心化、安全性和延迟，目前没有任何现有的启用技术具有区块链的所有优良特性。通常，可扩展性可以通过吞吐量、网络、存储等指标来衡量^[78]。

为了解决边缘侧的信任管理及区块链的扩展性问题，文[79]基于边缘计算与主从多链提出了分布式安全可信认证模型，同时结合智能合约对用户权限进行了细粒度划分，提升了区块链系统的吞吐量。此外，文[80]致力于联合优化区块链节点选择及计算卸载决策问题。然而，这项工作主要关注吞吐量，而忽略了许多可扩展性因素。

文[81]将区块链吞吐量、区块链计算任务的处理延迟和运营成本作为多目标优化问题，并且考虑到可扩展性问题的高维行动或状态，设计了基于DRL的算法来解决此优化问题。其中，离线深度神经网络可用于逼近动作价值函数，而在线动态深度Q-learning用于动作选择和动态网络更新。模拟结果表明，上述方案可以改善区块链的可扩展性。

3 边缘智能融合区块链的应用

区块链是一种颠覆性的技术，它将被广泛应用于边缘智能的各个领域中，同时对许多行业产生强烈的影响。此外，如图6所示，许多现有的文献强调了支持区块链的边缘智能应用。



图6 区块链在边缘智能的应用
Fig.6 Applications of blockchain in edge intelligence

3.1 车联网

IoV将不同的技术(如嵌入式计算、人工智能和网络数据视觉化)集成到一起，可以改善标准化的车载通信结构。然而，车联网架构仍面临许多挑战，包括安全性、隐私保护、协作等。区块链技术被认为是有效突破这些瓶颈的最佳方式^[82]。

文[83]针对边缘智能的不同层次，提出了一些基于区块链的解决方案。此外，文[83]还表明了使用机器学习算法能改善IoV各层执行活动的决策过程，并且区块链可以进一步提高网络的安全性。

3.2 智能医疗

随着技术的提升，智能医疗成为了人们关注的主要问题之一。特别是随着区块链的出现，该技术接管了医疗系统中的完整访问、交易和存储管理，从而促进了现有的医疗系统。

例如，文[84]提出了一种基于区块链的健康数据隐私保护方案——健康链。该方案对健康数据进行加密，以实现细粒度的访问控制。因此，健康链可以防止边缘的物联网数据和医生诊断结果被删除或篡改。文[85]提出了一种基于Ethereum的数据访问机制，可以抵抗已知的攻击并保持数据完整性。

3.3 智能制造

区块链技术可以应用到工业物联网中去实现各种操作。特别地，文[86]提出了一种新颖的迭代式双层混合智能模型。该模型主要将区块链与数字孪生技术融合，以消除制造车间中的不平衡或不一致问题，并实现大规模个性化范式。文[87]建立了一个新颖的可信平台，将区块链集成到云制造系统中。该平台不仅可以建立客户与特定服务之间的连接，还可以实现数据和信息的分布式共享。此外，文[88]提出了一种融合嵌入式计算和区块链技术

的智能制造系统。该系统可以平衡计算负载, 为终端设备提供更及时的响应, 同时促进设备级数据传输和制造服务交易。

3.4 智能电网

随着新型电池储能技术的发展, 大量的消费者将会变成使用可再生能源来发电和储存电力的生产性消费者。同时, 智能电网^[89]的提出旨在提供高效、安全、经济和可持续的电力。作为一个分散式数据库平台, 区块链为能源管理提供了全新的技术系统和商业模式^[90-91]。

文[92]引入了一种名为 DeepCoin 的基于区块链的能源框架。该框架通过使用可靠的点对点能源系统以实现高吞吐量, 并利用短签名和哈希函数生成区块, 增强了智能电网的安全性。文[93]主要利用账户映射技术解决智能电网中能源交易用户的隐私问题, 实现隐私保护和交易存储。

3.5 下一代通信网络

区块链可以充分发挥其在雾或云无线接入网络中的潜力, 实现动态访问控制、交换数据的完整性和有效性以及网络资源同步^[94-95]。

作为全球电信发展的下一个重要阶段, 5G 无线网络承诺为全球产业带来实质性的好处。与传统的蜂窝网络不同, 5G 无线网络将会是分散化的、无处不在的和面向多样化服务的。文[96]将区块链与 5G 网络及其后续技术集成起来, 以提高移动网络服务的灵活性和安全性。此外, 文[96]还基于区块链与联邦智能技术, 提出了一种新的数字孪生边缘网络架构, 旨在构建未来网络中的边缘智能系统, 从而降低业务时延, 提高服务响应速度, 并实现更高水平的系统可靠性。

文[97]聚焦 6G 网络中无人机应用场景, 对 6G 中应用于无人机通信的边缘智能计算、区块链、通信感知一体化等潜在关键技术进行了探讨, 同时展望了在 6G 场景下无人机通信面临的挑战, 加速推动了 6G 网络的部署落地。

4 边缘智能融合区块链的部署教程

本文提供了一个教程, 以成功地在边缘智能应用中部署区块链。

4.1 识别使用案例

在部署区块链于边缘智能应用中, 最重要的是识别项目中的使用案例。PwC 已经制定了一系列的标准, 可以帮助组织确定区块链在使用案例场景中的角色: 1) 是否有多方更新数据? 2) 是否有多方

共享数据? 3) 是否有验证要求? 4) 中介是否增加了复杂性? 5) 交易是否相互作用? 6) 交互是否是时间敏感的? 如果以上标准中至少满足 4 项, 那么区块链可能是解决问题的一个有前景的方案。

4.2 可用平台选择

现在有许多可以使用的区块链平台, 每个平台都认为自己在可扩展性、安全性、独特性或功能方面是最出色的。因此, 应根据开发的边缘智能应用程序的系统要求选择合适的区块链平台。

区块链类型 使用案例的区块链类型将根据具体情况而定。值得注意的是, Hyperledger Fabric 是最受欢迎的区块链之一^[98], 而 MultiChain 是用于在组织内部和组织间创建和部署私有区块链的现成平台^[99]。

依赖关系 一些区块链平台仍处于初始阶段, 它们引入了许多新的编程语言, 如 Java、Go、Python、Ruby、C++ 等。在选择区块链框架之前, 了解平台的 SDK 支持哪些编程语言非常重要。与大多数区块链平台相比, Multichain 平台不需要学习新的编程语言来开发智能合约软件解决方案和应用程序, 这可以提供更好的性能和应用程序。

其他特性 区块链网络应具备可扩展性, 以适应交易和参与者数量的增加, 同时注重平台的分布式存储和数据管理特性。

4.3 区块链初始化

本文以 Ethereum 为例, 介绍如何初始化一个区块链。具体而言, 首先需要创建第一个具备区块链所有特征的区块。然后将这些区块共享给所有的网络节点。接着, 创建一个 JSON 格式的文件, 用于开始创建区块链。需要指定一些参数, 如 Nonce (用于生成随机值的密码散列) 和 Timestamp (两个连续区块之间的验证时间)。在填充好 JSON 文件后, 客户端 Geth 将创建包含区块链的文件夹, 并对其进行初始化^[100]。最后, 还需要创建加密货币, 它将有助于快速传输数据, 并从网络参与者那里获取必要的算力。

4.4 智能合约创建

同样以 Ethereum 为例, 介绍如何部署和运行 Ethereum 智能合约。首先, 根据要实现的功能(如账户转账和链上数据存储), 需要创建智能合约。然后, 启动 Geth 和 Ethereum-Wallet 图形界面, 用于在 Ethereum 私有区块链上部署智能合约。在部署智能合约时, Ethereum-Wallet 调用 SOLC 将代码编译为 EVM 字节码, 通过 Geth 的 RPC 接口将 EVM 字节码发送到 Ethereum 网络, 经过网络验证后写入

每个由 Geth 管理的区块链。

同时,利用 Remix 来开发和调试 Solidity 智能合约。一旦合约经过测试,可以发布到 Ethereum 或任何支持 Solidity 智能合约的区块链平台上。Truffle 提供了一套工具,包括 Truffle、Ganache 和 Mauve,以帮助开发人员开始构建分布式边缘智能应用程序。

4.5 区块链激活

在完成上述步骤后,需要在区块链网络上激活边缘智能应用程序。需要注意的是,每个边缘智能应用程序必须托管在主要的区块链上。对于一些混合框架,建议在云服务器上进行初始化,如具有链上和链下实体的应用程序。

4.6 生态系统构建

随着越来越多的边缘智能应用程序在区块链上进行部署,建立一个生态系统将变得非常必要。这个生态系统将有助于增进对区块链行业的理解,并促进彼此之间的信任。此外,边缘智能应用程序的区块链结构需要经过精心设计,以确保它能够轻松解决组织中的任何问题,并且还要考虑到区块链行业规定和政策。

5 研究挑战与未来方向

尽管边缘智能在区块链的帮助下具有广阔前景,但仍存在一些持续挑战。

5.1 算力网络

目前,新兴技术(如人工智能、5G、边缘计算等)正在将算力从云服务器扩散到分布式网络设备中,加速了算力的普及。这些新机遇催生了新兴的计算框架。因此,算力网络应运而生,它旨在通过网络连接云端、边缘和终端资源,提供更加灵活高质量的人工智能服务,同时打破资源孤岛和垄断^[101-103]。

然而,现有的研究主要集中在无偿资源利用方面。区块链作为一个可信平台,能够支持可靠的资源管理,保证自主计算能力成员的付费服务可信度^[104]。然而,算力网络与区块链的复杂性,使资源分配变得艰巨。因此,如何将区块链纳入算力网络以提供付费服务仍然是一个具有挑战性的问题。

5.2 量化智能

万物互联的时代为无处不在的智能服务开辟了新的视野。自然地,需要考虑智能是否可以由大量连接的边缘设备共享和交换。根据 Big History Project^[105] 的说法,集体学习可以存储个体的思想并高

效地共享智能。与此同时,作为下一代网络范式,智能网络^[2]使智能与物质、能量和信息一样易于访问和共享。

由于区块链的优势,它可以作为第三方平台审计智能决策过程,并提供安全可靠的智能共享^[106]。激励机制将消除一些自利行为,并允许更多的边缘用户参与智能交互。然而,由于每个个体对智能的理解水平不同,如何量化边缘智能对于智能共享的成功至关重要。

特别地,能量可以量化为物质运动的速度。在香农的信息理论中,信息互联网使用“熵”来量化信息,而图灵测试目前没有对智能进行定量衡量,需要进一步的探索。

5.3 交易智能

随着边缘节点数量的增加,在边缘智能场景中,学习代理之间的协作将成为一个巨大的挑战。为促进学习机器的协作,智能交易成为一种有前景的解决方案。

然而,许多研究并没有关注大规模分布式协作机制。文[107]引入了一种可扩展的市场机制,即学习市场,用于协作和交易。学习市场利用智能合约来封装可扩展的协作关系,并构建一个可信的数据库,用于整个协作周期中的 AI 模型。此外,区块链网络可以共享本地智能,并进一步促进边缘的智能交易^[108]。因此,基于区块链开发分布式智能交易市场是可行且具有巨大发展前景的。

6 结论

本文重点研究了边缘智能与区块链的融合,利用区块链的互补特性,以弥补边缘智能的局限性。为此,本文研究区块链驱动的边缘智能和边缘智能驱动的区块链,进而为泛在智能服务开辟新的视野。本文从算力资源管理、数据管理和模型优化等方面探讨了区块链驱动的边缘智能,同时改善区块链以更好地支持边缘智能。此外,展示了区块链驱动的边缘智能应用,并给出具体的实施教程。最后,提出了未来的研究挑战和未来方向。

本文简要地探讨了与区块链驱动的边缘智能系统相关的技术。总体而言,边缘智能和区块链的融合仍处于起步阶段,未来还有许多挑战。希望这项工作将激发有关边缘智能和区块链的进一步讨论,并对边缘智能、区块链、未来的网络和其他领域提供一定的启发作用。

参考文献

- [1] ERICSSON. IoT connections outlook: NB-IoT and CAT-M technologies will account for close to 45 Percent of cellular IoT connections in 2024 [EB/OL]. [2022-01-30]. <https://www.ericsson.com/en/mobilityreport/reports/june-2019/iot-connections-outlook>.
- [2] YU F R. From information networking to intelligence networking: Motivations, scenarios, and challenges [J]. IEEE Network, 2021, 35(6): 209-216.
- [3] HEINTZ B, CHANDRA A, SITARAMAN R K. Optimizing grouped aggregation in geo-distributed streaming analytics [C/OL]// 24th International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing. New York, USA: ACM, 2015: 133-144.
- [4] 李肯立, 刘楚波. 边缘智能: 现状和展望 [J]. 大数据, 2019, 5(3): 69-75.
- LI K L, LIU C B. Edge intelligence: State-of-the-art and expectations [J]. Big Data Research, 2019, 5(3): 69-75.
- [5] 牛鑫, 呂现伟, 余辰. 边缘智能: 现状与挑战 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2023, 69(2): 270-282.
- LIU X, LYU X W, YU C. Edge intelligence: State-of-the-art and challenges [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2023, 69(2): 270-282.
- [6] 任姚丹珺, 戚正伟, 管海兵, 等. 工业互联网边缘智能发展现状与前景展望 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 104-111.
- REN Y D J, QI Z W, GUAN H B, et al. Development and prospect of edge intelligence for industrial internet [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 104-111.
- [7] ZHAO Z, BARIJOUGH K M, GERSTLAUER A. DeepThings: Distributed adaptive deep learning inference on resource-constrained IoT edge clusters [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2018, 37(11): 2348-2359.
- [8] 管菁, 管清宝. 融合物联网及边缘计算技术在智慧城市智能建筑中的应用和发展 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(11): 168-172.
- GUAN J, GUAN Q B. Application and development of integrating internet of things and edge computing technology in intelligent building of smart city [J]. Intelligent Building & Smart City, 2022(11): 168-172.
- [9] ZHANG S, WEI L, WU Y, et al. Enabling edge intelligence for activity recognition in smart homes [C/OL]// 15th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2018 [2023-06-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8567566>. DOI: 10.1109/MASS.2018.00044.
- [10] Edge intelligence (White paper) [EB/OL]. [2021-12-30]. <https://basecamp.iec.ch/download/iec-white-paper-edge-intelligence-en/>.
- [11] WANG X, HAN Y, LEUNG V, et al. Convergence of edge computing and deep learning: A comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(2): 869-904.
- [12] XU D, LI T, LI Y, et al. A survey on edge intelligence [EB/OL]. (2022-06-12) [2023-06-01]. <https://arxiv.org/abs/2003.12172>.
- [13] DENG S, ZHAO H, FANG W, et al. Edge intelligence: The confluence of edge computing and artificial intelligence [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 7457-7469.
- [14] 白翔, 许从方, 柳兴, 等. 区块链物联网安全技术综述及关键技术分析 [J]. 信息技术, 2022, 46(10): 24-30, 40.
- BAI X, XU C F, LIU X, et al. Review of blockchain-based Internet of things security technology and key technology analysis [J]. Information Technology, 2022, 46(10): 24-30, 40.
- [15] 邵奇峰, 金澈清, 张召, 等. 区块链技术: 架构及进展 [J]. 计算机学报, 2018, 41(5): 969-988.
- SHAO Q F, JIN C Q, ZHANG Z, et al. Blockchain: Architecture and research progress [J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(5): 969-988.
- [16] 李宗维, 孔德潮, 牛媛争, 等. 基于人工智能和区块链融合的隐私保护技术研究综述 [J]. 信息安全研究, 2023, 9(6): 557-565.
- LI Z W, KONG D C, NIU Y Z, et al. Towards a privacy-preserving research for AI and blockchain integration [J]. Journal of Information Security Research, 2023, 9(6): 557-565.
- [17] 傅丽玉, 陆歌皓, 吴义明, 等. 区块链技术的研究及其发展综述 [J]. 计算机科学, 2022, 49(z1): 447-461, 666.
- FU L Y, LU G H, WU Y M, et al. Overview of research and development of blockchain technology [J]. Computer Science, 2022, 49(z1): 447-461, 666.

- [18] 方俊杰, 雷凯. 面向边缘人工智能计算的区块链技术综述[J]. 应用科学学报, 2020, 38(1): 1–21.
FANG J J, LEI K. Blockchain for edge AI computing: A survey[J]. Journal of Applied Sciences, 2020, 38(1): 1–21.
- [19] 张鹏, 侯文静, 文红, 等. 基于区块链边缘计算下的多维资源管理系统[J]. 通信技术, 2021, 54(3): 637–641.
ZHANG P, HOU W J, WEN H, et al. Multi-dimensional resource management system for edge computing based on blockchain [J]. Communications Technology, 2021, 54(3): 637–641.
- [20] NGUYEN D C, PATHIRANA P N, DING M, et al. Blockchain for 5G and beyond networks: A state of the art survey[J/OL]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 166[2023–06–01]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804520301673>. DOI: 10.1016/j.jnca.2020.102693.
- [21] NGUYEN D C, PATHIRANA P N, DING M, et al. Integration of blockchain and cloud of things: Architecture, applications and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2521–2549.
- [22] YANG R, YU F R, SI P, et al. Integrated blockchain and edge computing systems: A survey, some research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(2): 1508–1532.
- [23] WANG R, LUO M, WEN Y, et al. The applications of blockchain in artificial intelligence[J/OL]. Security and Communication Networks, 2021, 2021[2023–06–05]. <https://www.hindawi.com/journals/scn/2021/6126247/>. DOI: 10.1155/2021/6126247.
- [24] NGUYEN D C, DING M, PATHIRANA P N, et al. Blockchain and AI-based solutions to Combat Coronavirus (COVID-19)-like epidemics: A survey[J]. IEEE Access, 2021, 9: 95730–95753.
- [25] LIU Y, 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.
- [26] 张平, 李世林, 刘宜明, 等. 区块链赋能的边缘异构计算系统中资源调度研究[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 1–14.
ZHANG P, LI S L, LIU Y M, et al. Resource management in blockchain-enabled heterogeneous edge computing system[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 1–14.
- [27] 李晓欢, 陈璧韬, 康嘉文, 等. 数字孪生辅助边缘智能中基于联盟博弈的联合资源优化[J]. 计算机科学, 2023, 50(2): 42–49.
LI X H, CHEN B T, KANG J W, et al. Coalition game-assisted joint resource optimization for digital twin-assisted edge intelligence[J]. Computer Science, 2023, 50(2): 42–49.
- [28] YAO H, MAI T, WANG J, et al. Resource trading in blockchain-based industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3602–3609.
- [29] ASHERALIEVA A, NIYATO D. Learning-based mobile edge computing resource management to support public blockchain networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(3): 1092–1109.
- [30] ASHERALIEVA A, NIYATO D. Distributed dynamic resource management and pricing in the IoT systems with blockchain-as-a-service and UAV-enabled mobile edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(3): 1974–1993.
- [31] 孙俨, 熊翱, 蒋承伶, 等. 基于区块链的计算与无线通信资源联合管理双向拍卖模型[J]. 通信学报, 2022, 43(11): 14–25.
SUN Y, XIONG A, JIANG C L, et al. Blockchain-based computing and wireless communication resource joint management double auction model[J]. Journal on Communications, 2022, 43(11): 14–25.
- [32] 裴翠, 范贵生, 虞慧群, 等. 基于拍卖的边缘云期限感知任务卸载策略[J]. 计算机科学, 2023, 50(4): 241–248.
PEI C, FAN G S, YU H Q, et al. Auction-based edge cloud deadline-aware task offloading strategy[J]. Computer Science, 2023, 50(4): 241–248.
- [33] LUONG N C, XIONG Z, WANG P, et al. Optimal auction for edge computing resource management in mobile blockchain networks: A deep learning approach[C/OL]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway, USA: IEEE, 2018 [2023–06–09]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8422743>. DOI: 10.1109/ICC.2018.8422743.
- [34] YU S, CHEN X, ZHOU Z, et al. When deep reinforcement learning meets federated learning: Intelligent multitime-scale resource management for multiaccess edge computing in 5G ultradense network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(4): 2238–2251.
- [35] FU X, YU F R, WANG J, et al. Resource allocation for blockchain-enabled distributed network function virtualization (NFV) with mobile edge cloud (MEC) [C/OL]//IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway, USA: IEEE, 2019 [2023–06–08]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9093788/authors#authors>.
- [36] GUO F, YU F R, ZHANG H, 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.

- [37] XIAO L, DING Y, JIANG D, et al. A reinforcement learning and blockchain-based trust mechanism for edge networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5460–5470.
- [38] 田琳琳, 李萌, 司鹏搏, 等. 基于边缘计算与区块链的车载计算资源智能调度研究 [J]. *高技术通讯*, 2023, 33(4): 390–401.
- TIAN L L, LI M, SI P B, et al. Intelligent scheduling of computing resource for the internet of vehicles based on edge computing and blockchain [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2023, 33(4): 390–401.
- [39] LI M, YU F R, SI P, et al. Resource optimization for delay-tolerant data in blockchain-enabled IoT with edge computing: A deep reinforcement learning approach [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9399–9412.
- [40] 巫光福, 王影军. 基于区块链与云-边缘计算混合架构的车联网数据安全存储与共享方案 [J]. *计算机应用*, 2021, 41(10): 2885–2892.
- WU G F, WANG Y J. Secure storage and sharing scheme of internet of vehicles data based on hybrid architecture of blockchain and cloud-edge computing [J]. *Journal of Computer Applications*, 2021, 41(10): 2885–2892.
- [41] LIN X, LI J, WU J, et al. Making knowledge tradable in edge-AI enabled IoT: A consortium blockchain-based efficient and incentive approach [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(12): 6367–6378.
- [42] 李明磊, 章阳, 康嘉文, 等. 基于多智能体强化学习的区块链赋能车联网中的安全数据共享 [J]. *广东工业大学学报*, 2021, 28(6): 62–69.
- LI M L, ZHANG Y, KANG J W, et al. Multi-agent reinforcement learning for secure data sharing in blockchain-empowered vehicular networks [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2021, 28(6): 62–69.
- [43] ZHU L, DONG H, SHEN M, et al. An incentive mechanism using shapley value for blockchain-based medical data sharing [C/OL]//IEEE International Conference on Big Data Security on Cloud, High Performance and Smart Computing and Intelligent Data and Security. Piscataway, USA: IEEE, 2019[2023-05-21]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8818983>. DOI: 10.1109/BigDataSecurity-HPSC-IDS.2019.00030.
- [44] HANLEY M, TEWARI H. Managing lifetime healthcare data on the blockchain [C/OL]//IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation. Piscataway, USA: IEEE, 2018[2023-05-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8560055>. DOI: 10.1109/SmartWorld.2018.00077.
- [45] SHARMA V, YOU I, JAYAKODY D, et al. Neural-blockchain based ultra-reliable caching for edge-enabled UAV networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(10): 5723–5736.
- [46] DAI Y, XU D, ZHANG K, et al. Deep reinforcement learning and permissioned blockchain for content caching in vehicular edge computing and networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4312–4324.
- [47] QIAN Y, JIANG Y, HU L, et al. Blockchain-based privacy-aware content caching in cognitive internet of vehicles [J]. *IEEE Network*, 2020, 34(2): 46–51.
- [48] ZHANG R. Blockchain-incentivized D2D and mobile edge caching: A deep reinforcement learning approach [J]. *IEEE Network*, 2020, 34(4): 150–157.
- [49] LIU C H, LIN Q, WEN S. Blockchain-enabled data collection and sharing for industrial IoT with deep reinforcement learning [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(6): 3516–3526.
- [50] KHAN M A, ABBAS S, SAKHAWAT A R, et al. A machine learning approach for blockchain-based smart home networks security [J]. *IEEE Network*, 2021, 35(3): 223–229.
- [51] KESHK M, TURNBULL B, MOUSTAFA N, et al. A privacy-preserving-framework-based blockchain and deep learning for protecting smart power networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(8): 5110–5118.
- [52] 万涛, 李婉琦, 葛晶晶. 基于区块链的边缘移动群智感知声誉更新方案 [J]. *计算机应用研究*, 2023, 40(6): 1636–1640.
- WAN T, LI W Q, GE J J. Reputation update scheme for blockchain-based edge mobile crowdsensing [J]. *Application Research of Computers*, 2023, 40(6): 1636–1640.
- [53] 周炜, 王超, 徐剑, 等. 基于区块链的隐私保护去中心化联邦学习模型 [J]. *计算机研究与发展*, 2022, 59(11): 2423–2436.
- ZHOU W, WANG C, XU J, et al. Privacy-preserving and decentralized federated learning model based on the blockchain [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2022, 59(11): 2423–2436.
- [54] 孙睿, 李超, 王伟, 等. 基于区块链的联邦学习研究进展 [J]. *计算机应用*, 2022, 42(11): 3413–3420.
- SUN R, LI C, WANG W, et al. Research progress of blockchain-based federated learning [J]. *Journal of Computer Application*,

- tions, 2022, 42(11): 3413–3420.
- [55] 于秋雨, 卢清华, 张卫山. 基于区块链的工业物联网联邦学习系统架构[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(9): 69–76.
YU Q Y, LU Q H, ZHANG W S. Federated learning system architecture in industrail IoT based on blockchain[J]. Computer Systems & Applications, 2021, 30(9): 69–76.
- [56] LI J, WU J, LI J, et al. Blockchain-based trust edge knowledge inference of multi-robot systems for collaborative tasks[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(7): 94–100.
- [57] JIANG X, YU F R, SONG T, et al. Edge intelligence for object detection in blockchain-based internet of vehicles: Convergence of symbolic and connectionist AI[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(4): 49–55.
- [58] 殷昱煜, 叶炳跃, 梁婷婷, 等. 边缘计算场景下的多层区块链网络模型研究[J]. 计算机学报, 2022, 45(1): 115–134.
YIN Y Y, YE B Y, LIANG T T, et al. Research on multi-layer blockchain network model in edge computing[J]. Chinese Journal of Computers, 2022, 45(1): 115–134.
- [59] CHENLI C H, LI B Y, SHI Y Y, et al. Energy-recycling blockchain with proof-of-deep-learning[C/OL]//IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency. Piscataway, USA: IEEE, 2019[2023–06–06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8751419>. DOI: 10.1109/BLOC.2019.8751419.
- [60] QIU C, YAO H, WANG X, et al. AI-chain: Blockchain energized edge intelligence for beyond 5G networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(6): 62–69.
- [61] BALDOMINOS A, SAEZ Y. Coin.AI: A proof-of-useful-work scheme for blockchain-based distributed deep learning[J/OL]. Entropy, 2019, 21(8)[2023–06–01]. <https://www.mdpi.com/1099-4300/21/8/723>. DOI: 10.3390/e21080723.
- [62] LUO J, YU F R, CHEN Q, et al. Blockchain-enabled software-defined industrial internet of things with deep recurrent Q-network[C/OL]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway, USA: IEEE, 2020[2023–06–01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9149217>. DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9149217.
- [63] QIU C, YAO H, YU F R, et al. A service-oriented permissioned blockchain for the internet of things[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2019, 13(2): 203–215.
- [64] QIU C, REN X, CAO Y, et al. Deep reinforcement learning empowered adaptivity for future blockchain networks[J]. IEEE Open Journal of the Computer Society, 2020, 2: 99–105.
- [65] JIANG S, LI X, WU J. Multi-leader multi-follower stackelberg game in mobile blockchain mining[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2020, 21(6): 2058–2071.
- [66] GAO Y, WU W, NAN H, et al. Deep reinforcement learning based task scheduling in mobile blockchain for IoT applications[C/OL]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway, USA: IEEE, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9148888>. DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9148888.
- [67] NGUYEN D C, PATHIRANA P N, DING M, et al. Privacy-preserved task offloading in mobile blockchain with deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020[2023–05–27], 17(4): 2536–2549.
- [68] 王思明, 谭北海, 余荣. 面向6G可信可靠智能的区块链分片与激励机制[J]. 计算机科学, 2022, 49(6): 32–38.
WANG S M, TAN B H, YU R. Blockchain sharding and incentive mechanism for 6G dependable intelligence[J]. Computer Science, 2022, 49(6): 32–38.
- [69] ERMILOV D, PANOV M, YANOVICH Y. Automatic bitcoin address clustering[C/OL]//16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications. Piscataway, USA: IEEE, 2017[2023–05–23]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8260674>. DOI: 10.1109/ICMLA.2017.0–118.
- [70] MONAMO P M, MARIVATE V, TWALA B. A multifaceted approach to bitcoin fraud detection: Global and local outliers[C/OL]//15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications. Piscataway, USA: IEEE, 2017[2023–06–06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7838143>. DOI: 10.1109/ICMLA.2016.0039.
- [71] LORENZ J, SILVA M I, APARÍCIO D, et al. Machine learning methods to detect money laundering in the Bitcoin blockchain in the presence of label scarcity[EB/OL]. (2021–10–05)[2023–06–07]. <https://arxiv.org/abs/2005.14635>.
- [72] ASHIZAWA N, YANAI N, CRUZ J P, et al. Eth2Vec: Learning contract-wide code representations for vulnerability detection on ethereum smart contracts[EB/OL]. (2021–01–08)[2023–06–01]. <https://arxiv.org/abs/2101.02377>.
- [73] CHEN Z Q, WANG W Y, YAN X, et al. Cortex-AI on blockchain[EB/OL]. [2022–01–30]. https://cryptorating.eu/whitepapers/Cortex/Cortex_AI_on_Blockchain_EN.pdf.
- [74] ARUMUGAM S S, UMASHANKAR V, NARENDRA N C, et al. IoT enabled smart logistics using smart contracts[C/OL]//8th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences. Piscataway, USA: IEEE, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8593220>. DOI: 10.1109/LISS.2018.8593220.

- [75] TANN J W, XING J H, GUPTA S S, et al. Towards safer smart contracts: A sequence learning approach to detecting vulnerabilities[EB/OL]. (2019-06-07)[2023-06-09]. <https://arxiv.org/abs/1811.06632>.
- [76] QIAN P, LIU Z, HE Q, et al. Towards automated reentrancy detection for smart contracts based on sequential models[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 19685–19695.
- [77] BADRUDDOJA S, DANTH R, HE Y, et al. Making smart contracts smarter[C/OL]//IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency. Piscataway, USA: IEEE, 2021[2023-06-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9461148>. DOI: 10.1109/ICBC51069.2021.9461148.
- [78] 孙知信, 张鑫, 相峰, 等. 区块链存储可扩展性研究进展[J]. *软件学报*, 2021, 32(1): 1–20.
- SUN Z X, ZHANG X, XIANG F, et al. Survey of storage scalability on blockchain[J]. *Journal of Software*, 2021, 32(1): 1–20.
- [79] 黄敏敏, 袁凌云, 潘雪, 等. 边缘计算与区块多链下的安全可信认证模型[J]. *计算机科学与探索*, 2023, 17(3): 733–747.
- HUANG M M, YUAN L Y, PAN X, et al. Secure and trusted authentication model under edge computing and multiblockchain [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2023, 17(3): 733–747.
- [80] QIU C, YU F R, YAO H, et al. Blockchain-based software-defined industrial internet of things: A dueling deep Q-learning approach[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 6(3): 4627–4639.
- [81] FU X, YU R, WANG J, et al. Performance optimization for blockchain-enabled distributed network function virtualization management and orchestration[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(6): 6670–6679.
- [82] 郝敏, 叶东东, 余荣, 等. 区块链赋能的6G零信任车联网可信接入方案[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(9): 3004–3013.
- HAO M, YE D D, YU R, et al. Blockchain empowered trustworthy access scheme for 6G zero-trust vehicular networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(9): 3004–3013.
- [83] MENDIBOURE L, CHALOUF M A, KRIEF F. Survey on blockchain-based applications in internet of vehicles[J/OL]. *Computers & Electrical Engineering*, 2020, 84 [2023-05-29]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790620305012>. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2020.106646.
- [84] XU J, XUE K, LI S, et al. Healthchain: A blockchain-based privacy preserving scheme for large-scale health data[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 8770–8781.
- [85] RAMANI V, KUMAR T, AN B, et al. Secure and efficient data accessibility in blockchain based healthcare systems[C/OL]//IEEE Global Communications Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2018 [2023-05-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8647221>. DOI: 10.1109/GLOCOM.2018.8647221.
- [86] LENG J, YAN D, LIU Q, et al. ManuChain: Combining permissioned blockchain with a holistic optimization model as bi-level intelligence for smart manufacturing[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 50(1): 182–192.
- [87] ZHI L, BARENJI A V, HUANG G Q. Toward a blockchain cloud manufacturing system as a peer to peer distributed network platform[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 54: 133–144.
- [88] LEE C, HUO Y Z, ZHANG S Z, et al. Design of a smart manufacturing system with the application of multi-access edge computing and blockchain technology[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 28659–28667.
- [89] 方嘉祥. 智能电网信息安全及新技术研究综述[J]. *科技与创新*, 2022(4): 21–25.
- FANG J X. Survey on smart grid information security and new technology research[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2022(4): 21–25.
- [90] 柳扬, 沈建良, 开末平, 等. 基于区块链的智能电网安全管控研究与应用[J]. *制造业自动化*, 2023, 45(6): 23–28, 34.
- LIU Y, SHEN J L, KAI M P, et al. Research and application of smart power grid security control based on block chain[J]. *Manufacturing Automation*, 2023, 45(6): 23–28, 34.
- [91] 付晓琳, 王鸿, 王致杰. 基于区块链的微电网智能交易与协同调度策略研究[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(9): 100–110.
- FU X L, WANG H, WANG Z J. Research on smart transaction and collaborative scheduling strategy of micro-grid based on block-chain[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(9): 100–110.
- [92] FERRAG M A, MAGLARAS L. DeepCoin: A novel deep learning and blockchain-based energy exchange framework for smart grids[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2019, 67(4): 1285–1297.

- [93] GAI K, WU Y, ZHU L, et al. Privacy-preserving energy trading using consortium blockchain in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3548–3558.
- [94] KUO P H, MOURAD A, AHN J. Potential applicability of distributed ledger to wireless networking technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(4): 4–6.
- [95] CUI H, CHEN Z, LIU N, et al. Blockchain-driven contents sharing strategy for wireless cache-enabled D2D networks[C/OL]//IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2019[2023-06-04]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8757177>. DOI: 10.1109/ICCW.2019.8757177.
- [96] 张彦, 卢云龙. 数字孪生边缘网络[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 21–25.
ZHANG Y, LU Y L. Digital twin edge networks[J]. ZTE Technology Journal, 2023, 29(3): 21–25.
- [97] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781–789.
CHEN X Y, SHENG M, LI B, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 781–789.
- [98] Hyperledger Foundation. Hyperledger fabric[EB/OL]. [2022-01-30]. <https://www.hyperledger.org/use/fabric>.
- [99] Multichain. Enterprise blockchain[EB/OL]. [2022-01-30]. <https://www.multichain.com>.
- [100] KLAINE P V, ZHANG L, IMRAN M A, et al. An implementation of a blockchain-based data marketplace using Geth[C/OL]//3rd Conference on Blockchain Research & Applications for Innovative Networks and Services. Piscataway, USA: IEEE, 2021[2023-04-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9569838>. DOI: 10.1109/BRAINS52497.2021.9569838.
- [101] 任晓旭, 谭清超, 邓辉, 等. 基于端边云超融合的算力网络架构[J]. 计算机应用, 2022, 42(S01): 195–200.
REN X X, TAN J C, DENG H, et al. Computing power network framework based on end-edge-supercloud collaboration[J]. Journal of Computer Applications, 2022, 42(S01): 195–200.
- [102] 刘泽宁, 李凯, 吴连涛, 等. 多层次算力网络中代价感知任务调度算法[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(9): 1810–1822.
LIU Z N, LI K, WU L T, et al. CATS: Cost aware task scheduling in multi-tier computing networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(9): 1810–1822.
- [103] 雷波, 刘增义, 王旭亮, 等. 基于云、网、边融合的边缘计算新方案: 算力网络[J]. 电信科学, 2019(9): 44–51.
LEI B, LIU Z Y, WANG X L, et al. Computing network: A new multi-access edge computing[J]. Telecommunications Science, 2019(9): 44–51.
- [104] 裴璐洁, 王目. 区块链赋能的算力网络协同资源调度方法[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(4): 750–762.
ZHONG L J, WANG M. Blockchain-empowered cooperative resource allocation scheme for computing first network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60(4): 750–762.
- [105] The big history project[EB/OL]. [2022-01-30]. <https://www.bighistoryproject.com>.
- [106] YU F R. From the internet of information to the internet of intelligence[EB/OL]. (2019-08-30)[2023-06-10]. <https://arxiv.org/abs/1909.08068>.
- [107] OUYANG L, 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.
- [108] XU H, JIANG B. Study on a security intelligence trading platform based on blockchain and IPFS[J]. Journal of Computer Virology and Hacking Techniques, 2021, 17: 131–137.

作者简介

任晓旭(1994-), 女, 博士生。研究领域为算力网络, 区块链, 边缘计算, 边缘智能。

仇超(1988-), 女, 博士, 副教授。研究领域为算力网络, 区块链, 边缘计算, 边缘智能。

邓辉(1982-), 男, 硕士, 高级工程师。研究领域为智慧城市, 智能交通, 人工智能, 大数据, 云计算和边缘计算。

戴子明(2001-), 男, 硕士。研究领域为边缘智能, 联邦学习。

刘泽军(2000-), 女, 硕士生。研究领域为算力网络, 资源博弈。

王晓飞(1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究领域为5G边缘计算, 边缘智能, 区块链, 算力网络。