

## 区块链:元宇宙的核心基础设施

李 鸣<sup>1,2,3</sup>, 张 亮<sup>1,2</sup>, 宋文鹏<sup>1,2</sup>, 吴美玉<sup>4,5</sup>

(1. 复旦大学 计算机科学技术学院 上海市智能信息处理重点实验室, 上海 200433;

2. 上海区块链工程技术研究中心, 上海 200433; 3. 中国电子技术标准化研究院, 北京 100007;

4. 北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100191; 5. 城市运行应急保障模拟技术北京市重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 当前, 元宇宙产业热度极高, 或将形成庞大的信息消费生态, 成为数字经济的重要组成部分, 然而业界对于元宇宙概念的定义多为叙事性描述, 缺乏体系化研究和工程化应用。元宇宙产业发展的基础是厘清其本质和内涵, 明确元宇宙的基础设施和技术体系, 以对元宇宙产业的工程应用提供实际帮助。通过分析元宇宙的背景和产业情况, 研究元宇宙内涵和外延, 提出区块链是元宇宙的核心基础设施, 可从技术平台、应用场景、协作机制等方面对元宇宙提供关键支持。元宇宙的技术参考模型包括元网络、元系统、元服务、元应用、元空间等5层, 而区块链的关键技术组件覆盖了元宇宙技术参考模型的核心部分, 密码学和分布式身份认证体系可支撑元宇宙的组织、身份、资产、活动等4个关键要素以建立元宇宙的身份价值网络, 金融资产协议、加密货币体系和数字资产凭证也将辅助构建元宇宙经济金融体系。同时, 对基于区块链的元宇宙概念和术语体系、技术体系的集成方法、分布式商业应用场景等未来发展方向进行展望。

**关键词:** 元宇宙; 区块链; 第三代互联网; 数字新生态; 价值交互网络; 核心基础设施

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 李鸣, 张亮, 宋文鹏, 等. 区块链: 元宇宙的核心基础设施[J]. 计算机工程, 2022, 48(6): 24-32, 41.

英文引用格式: LI M, ZHANG L, SONG W P, et al. Blockchain: core Metaverse infrastructure[J]. Computer Engineering, 2022, 48(6): 24-32, 41.

## Blockchain: Core Metaverse Infrastructure

LI Ming<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Liang<sup>1,2</sup>, SONG Wenpeng<sup>1,2</sup>, WU Meiyu<sup>4,5</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Information Processing, School of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Blockchain, Shanghai 200433, China;

3. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China;

4. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China;

5. Beijing Key Laboratory of Emergency Support Simulation Technologies for City Operations, Beijing 100191, China)

**[Abstract]** The Metaverse industry is extremely hot, and is poised to form a significant information consumption ecosystem, becoming an important part of the digital economy. However, there are different opinions regarding how the Metaverse industry should be understood, most of which are narrative descriptions lacking systematic research and engineering practice. The development of the Metaverse industry is based on clarifying its essence and connotative meaning, clarifying its infrastructure and technological system, and providing practical assistance to its engineering practice. Based on an analysis of the background and industrial state of the Metaverse, this paper describes its connotation and extension, and proposes the idea that Blockchain is its core technical infrastructure, providing key support to the Metaverse in terms of technology platform, application scenarios, and the collaboration mechanism. A technical reference model of the Metaverse includes five layers: meta-network, meta-system, meta-service, meta-application, and meta-space. The key technologies of the Blockchain component cover the core technical reference model of the Metaverse. In addition, the cryptography and distributed authentication system of Blockchain can support the organization, identity, asset, and activities to build an identity value network of the Metaverse. At the same time, the financial asset protocol, cryptocurrency system, and digital asset certificate of Blockchain will also help in building an economic and financial system for the Metaverse. Finally, the future development of the concept and terminology system

**基金项目:** 国家重点研发计划(2019YFB2101703); 国家自然科学基金(U19A2066); 上海市科技创新行动计划(20511102200, 20222420800)。

**作者简介:** 李 鸣(1975—), 男, 工程师、博士研究生, 主研方向为区块链、密码学; 张 亮、宋文鹏、吴美玉(通信作者), 博士研究生。

**收稿日期:** 2022-03-07 **修回日期:** 2022-04-13 **E-mail:** 13701388822@139.com

of the Metaverse, an integration method of its technology system, and distributed business application scenarios based on Blockchain are all predicted.

【Key words】Metaverse; Blockchain; third generation Internet; digital new ecology; value interaction network; core infrastructure

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0064120

## 0 概述

目前,对于元宇宙概念的定义众说纷纭,技术、应用、资产、服务、产业、生态、哲学等不同层次的定义混杂,严重影响业界对元宇宙的认识。尽管元宇宙不是技术词汇,但却需要复杂的底层技术逻辑支撑。区块链<sup>[1]</sup>、人工智能、数字孪生、人机交互、物联网等面向数据的新一代信息技术的演进是从Web2.0向Web3.0<sup>[2]</sup>演进的技术准备。虽然技术就绪度尚有发展空间,但已基本完成单项技术体系的构建。以往各项技术的独立发展没有形成闭环的商业生态,是因为各项数字科技的技术特性只覆盖数字经济的一部分。例如,物联网数据采集、5G传输、大数据处理、人工智能利用和区块链保障,每项技术都仅完成了数据要素生命周期的一部分,需要更大、更聚焦的概念、场景和商业模式拉动新一代信息技术的进一步融合,从而构建面向数字化生态的基础设施,以支撑元宇宙复杂的应用逻辑、业务创新和商业模式。因此,从技术上来看,元宇宙是基于区块链技术体系和运作机制支撑下的可信数字化价值交互网络以及以区块链为核心的Web3.0数字新生态,能推动数字产业化和产业数字化。

本文从区块链实现元宇宙基础设施、提供虚拟世界中的身份价值网络、构建经济金融体系3个方面说明区块链在元宇宙中的核心技术地位,并分析如何通过区块链构建元宇宙中的可信数字化价值交互网络。应用本体论思想定义元宇宙是数字生态的集成逻辑表达,明确促进元宇宙健康发展的4项核心要素。列举目前基于区块链构建的数字货币、鉴证及交易市场应用技术,总结在元宇宙中进行价值交换的交易特征。

## 1 元宇宙

### 1.1 元宇宙发展现状

元宇宙概念来自1992年出版的科幻小说作家尼尔·斯蒂芬森的著作《雪崩》。在2021年迅速升温,被各大国外公司在游戏、娱乐、文化等应用领域部署市场。3月,美国沙盒游戏平台Roblox将元宇宙概念写入招股说明书中,上市后首日市值超过400亿美元。7月,Facebook首席执行官马克·扎克伯格成立元宇宙产品团队,并将母公司名称改为“Meta”。在国内元宇宙市场上:百度发布国内首个元宇宙产品“希壤”;字节跳动收购国内VR头显的龙头企业Pico,基于其庞大的产品矩阵布局元宇宙。元宇宙概念在资本市场和技术领域的兴起,获得了极高的社会关注度。一部分人认为,元宇宙代表未来发展的新方向,即虚拟分身在虚拟世界进行生活、工作与互动。另一部分人认为,基于目前体验仍有缺陷的VR/AR技术,目前元宇宙只是一种噱头,科技公司争相蹭热点。元宇宙概念起源于科幻小说,发展于文化娱乐应用场景,现已具有经济闭环体系的特征<sup>[3]</sup>。当前的元宇宙并非最终状态,但可被视为已出现应用探索、底层技术基础和全新经济模式的动态演化状

态<sup>[3]</sup>。随着技术迭代更新和更多的资本注入,元宇宙代表的虚实二元世界极有可能成为现实。

### 1.2 元宇宙本体

#### 1.2.1 元宇宙概念

目前,业界及学者们对于元宇宙的界定有不同的理解。从元宇宙的英文“Metaverse”进行字面解读,其中:“meta”即“元”,表示超级、超越;“verse”代表“universe”,表示世界、广泛的空间。因此,字面意义上的元宇宙指的是超越现实的、由更高维度构成的世界。WRIGHT等<sup>[4]</sup>介绍了元宇宙通过虚拟世界与现实世界的众多节点连接和重叠,从而构成新一代的增强现实交互空间。DAVIS等<sup>[5]</sup>总结元宇宙的5个关键结构,即元宇宙本身、人/化身、元宇宙技术能力、行为和结果。KINSNER<sup>[6]</sup>认为元宇宙是具有生命力的互联网,通过软硬件基础设施实现互联,形成具有高度体验感的社会网络。加速研究基金会(Acceleration Studies Foundation, ASF)<sup>[7]</sup>将元宇宙定义为虚拟增强的物理现实和物理上持续存在的虚拟空间的融合,既可以指代为一套特定的虚拟化3D网络技术,又可以表示为在线生活的公认标准方式。进一步地,ASF将元宇宙区分为体验虚拟故事的虚拟世界、反映当前现实世界的镜像世界、现实世界中增强信息混合体的增强现实以及捕捉和存储有关人和事日常信息的生活日志,这4个场景强调不同的功能、类型或元宇宙技术集。袁园等<sup>[3]</sup>认为元宇宙是源自游戏平台,由数字货币、数字技术和硬件技术同步支持,深度融入人类生活的虚拟世界及生存远景。李默<sup>[8]</sup>认为元宇宙是来自现实世界、与现实世界平行的且真实度越来越高的数字虚拟世界。方凌智等<sup>[9]</sup>认为因为互联网的功用中心由信息转移到发送、使用信息的主体(即人),这种转变促进信息媒介技术的发展迭代,能够给人类社会带来变革并塑造出全新的社会形态。

上述的定义多从元宇宙的组成出发进行界定,笔者认为对于元宇宙的界定,需要关注元宇宙的根本逻辑,即价值交互网络。因此,元宇宙是基于Web3.0技术体系和运作机制支撑下的可信数字化价值交互网络,是以区块链为核心的Web3.0数字新生态,是推动数字产业化和产业数字化的重要手段。同时,本体论是研究世界本源或基础性质的哲学理论,通过本体论可以剖析事务或现象的本质。应用本体论的思想,元宇宙是数字共识生态的集成逻辑表达,其中:数字是指元宇宙的核心要素一定是在数字空间中,并通过数字技术表现;共识是指元宇宙的相关方共同参与元宇宙生态的治理,并通过共识过程确定元宇宙生态的发展路线;生态是指元宇宙需要众多相关方参与,形成相互影响、相互促进的动态平衡的统一体;集成是指元宇宙需要通过众多技术形成集成体,以支持生态的稳定运行;逻辑是指元宇宙是众多要素组合的系统,各项要素之间有相互逻辑关系,各项要素自身也需要有内在的逻辑体系;表达是指元宇宙要在不同层次上都呈现出特定的表现形式,从而形成聚像、可工程化的最佳应用。

### 1.2.2 元宇宙相关技术

DIONISIO等<sup>[10]</sup>总结了元宇宙核心组成部分的真实性、泛在性、互操作性、可扩展性等4个技术特征,其中:真实性要求虚拟空间足够逼真,使用户在心理和情感上沉浸在虚拟空间;泛在性要求构成元宇宙的虚拟空间可以通过所有现有的数字设备(台式机、平板电脑、移动设备),而且用户的虚拟身份或集体身份可以通过这些设备来实现,用户的虚拟身份或集体角色在元宇宙的整个转换过程中保持完整且不变;互操作性要求虚拟空间符合标准,以便用于重建或渲染虚拟环境的数字资产在具体实施中保持互换性,以及用户可以在不同地点之间无缝移动而不中断沉浸式体验;可扩展性要求服务器架构能提供足够的动力,使大量的用户能够占据元宇宙而不影响系统效率和用户体验。根据以上技术特征,可细化到具体的相关技术,在信息传输方面有5G/6G的产生,在互联网方面有Web3.0的迭代,在人工智能方面有算法和机器学习的支撑,在硬件技术上有VR/AR/MR/XR的产品问世,在数据采集和处理方面有大数据、云计算等服务,在分布式治理上有区块链保障信息的不可篡改与可追溯<sup>[3]</sup>。ENO等<sup>[11]</sup>构建基于三维多用户虚拟世界的内容收集系统,可用于跨世界搜索引擎,实现将虚拟世界与更广泛的网络联系起来。此外,作者还编写爬取用户生成内容的智能代理爬虫程序,这些程序可提高研究人员识别世界内动态、沉浸式环境的能力。EGLISTON等<sup>[12]</sup>认为VR是一个数据密集型设备,通过听觉、视觉和触觉反馈营造用户在虚拟环境中的沉浸感。CHESLACK-POSTAVA等<sup>[13]</sup>设计并实现了针对元宇宙的Sirikata服务器。Sirikata服务器的可扩展性能够支持大型复杂的世界建模,允许用户查看整个世界并与其进行交互,同时通过在核心系统中利用现实世界和3D环境的属性同时实现这

两个目标,例如基于可见尺寸服务虚拟对象查询的新型分布式数据结构。

### 1.2.3 以区块链为核心的元宇宙技术参考模型

目前,学者们对于元宇宙模型的研究较少。SÉBASTIEN等<sup>[14]</sup>认为元宇宙可实现沉浸式虚拟世界的三维表现,支撑建立识别和帮助管理生物多样性的信息系统。该文对生物多样性专用信息系统中存储信息的元空间的不同可能性展开研究,介绍了虚拟世界生成的一般过程、要求、元数据结构的不同模型,以及可用于完善细节层次的元数据。RYSKELDIEV等<sup>[15]</sup>提出并实施了基于区块链的分布式模型,该模型可用于点对点的存档、回收和共享混合现实中的社会和协作应用的虚拟空间,并且可在地图应用中作为混合现实空间的球形图像替代来源,实现将整个元空间存储在一个JSON数组中以便于以纯文本形式进行存储和共享。

通过分析区块链技术特点和元宇宙的生态逻辑,将元宇宙分为元网络、元系统、元服务、元应用和元空间五层,如图1所示。元网络是元宇宙运行的底座,它包含了通信、存储、计算、网络等支撑性技术,区块链的点对点通信、分布式存储、分布式计算和分布式网络为元宇宙提供底层基础设施。元系统以区块链的数字签名、时序服务、激励机制、共识机制、加密算法和分布式账本为核心,为元宇宙提供系统支持。同时,需要融合云计算、大数据、人机交互、人工智能、信息安全和数字孪生等技术。元服务层主要以元系统为支撑,为元应用场景提供支持。区块链相关的加密货币、数字资产、身份认证等功能为元宇宙经济体系提供核心支撑,同时需要融合内容生成、模拟仿真、环境渲染等技术为沉浸式体验提供支撑。元应用和元空间主要通过网络、系统和服务来支撑,这里不做过多论述。

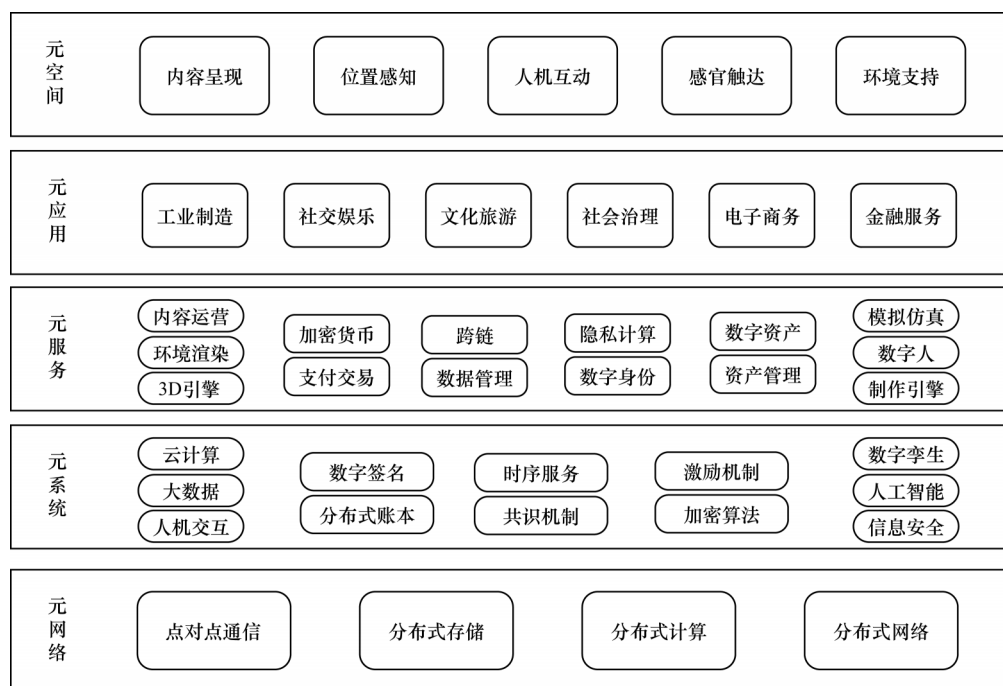


图1 以区块链为核心的元宇宙技术参考模型

Fig.1 Metaverse technical reference model with Blockchain as its core



### 1.3 元宇宙主要应用领域

目前,元宇宙主要应用于教育教学、文化娱乐、电子商务、医疗救援等领域。在教育领域,元宇宙技术可以为学习者提供沉浸式的教学体验,加强课堂教学<sup>[16]</sup>,有效缓解学习者的沟通困难问题<sup>[17]</sup>。文献[18]基于人脸识别技术提出一种新的语言教育范式,构建物理校园与虚拟校园同步的元宇宙系统。将人脸识别算法应用于元宇宙中在线/离线用户展现,基于XR技术的体验式学习内容被引入每个学习步骤中,以完成对单词的学习。文献[19]在虚拟学习课程元宇宙中引入检测学生虚拟化身眨眼的系统,通过对眨眼次数进行统计和分析,可以提高虚拟学习效果。浙江大学通过对众筹式混合云、科研数据平台、同声传译和遥感技术进行结合,推出高精度虚拟会议场景元宇宙平台——“研在浙大”2.0。

在文化娱乐领域:2020年12月8日,美国歌手Travis Scott在Fortnite举办的虚拟音乐会,吸引了1 200多万人在线参与;美国元宇宙游戏开发商Gamefam开发的Roblox是一款兼容虚拟世界、休闲游戏和内容开发的游戏,可以实现用户自行输出内容,并基于平台自有的数字货币Tobux构建闭环经济系统;文献[20]构建了结合博物馆内指示标志和头戴式显示器的博物馆游客内容服务架构。该架构连接了博物馆内的指示标志与头显,提供了基于增强现实的虚拟世界体验与文物讲解服务。

在电子商务领域:文献[21]提出基于数字孪生技术的电子商务平台商业模式,将实时商务与元宇宙相结合克服了现有在线购物平台缺乏产品体验的局限性,通过商业模式画布和可视化的核心业务活动详细解释该商业模式,基于该平台消费者可以在虚拟世界中观看和感受品牌,体验产品功能并提升购物体验,卖家可通过元宇宙创造创新内容以维护品牌知名度和忠实客户;文献[22]开发了服务虚拟世界的小额支付系统,但该系统要集成的部分软件存在发行方未知、开源代码易被篡改的问题,因此在虚拟环境中的交易价值通常非常小,使得交易成本相应增加。

## 2 基于区块链的元宇宙基础设施

在ISO 22739:2020《区块链和分布式账本技术词汇》标准中给出了区块链的明确定义,即区块链是用密码技术将共识确认的区块按顺序追加形成的分布式账本,具有技术、金融和社会属性。区块链技术已经超越了传统金融支付解决方案,为许多部门、行业带来了变革的潜力。鉴于区块链技术的普遍性、发展性、开放性和透明性,可以将其理解作为一种可信的信息基础设施。

回顾区块链的发展历程,技术属性相关的BaaS<sup>[23]</sup>、跨链<sup>[24]</sup>、隐私计算<sup>[25]</sup>、身份认证<sup>[26]</sup>、分布式存储和计算<sup>[27]</sup>等底层平台为金融、制造、教育、能源等行业的分布式应用提供了基础设施。金融属性相关的同质化通证

(Fungible Token, FT)、分布式金融(Decentralized Finance, DeFi)<sup>[28]</sup>、非同质化通证(Non-Fungible Token, NFT)<sup>[29]</sup>和xFi(泛指在各个领域的金融形式)通过大量的应用探索数字化金融服务模式。其中:FT在金融体系中探索了新载体的可能,利用区块链技术解决了数字环境下金融交易的双花等问题;DeFi尝试创新传统金融服务模式,基于分布式网络环境的借贷、质押、交易等金融服务纷纷出现;NFT进一步在数字生态中呈现了资产的表现形式,在映射物理资产的同时催生了大量原生数字资产,扩大了数字经济的资产规模和想象空间;游戏金融(GameFi)尝试将NFT带入到特定的真实消费场景;社交金融(SocialFi)进一步扩大了GameFi的应用场景,在增加了数字协作活动的同时,增加了数字资产的消费空间;xFi的出现为FT和NFT提供了更多样化、个性化的娱乐和社交的信息消费场景,未来更多xFi将会出现在教育、能源、制造、旅游等产业中,这将进一步加速数字环境下的资产流通和信息消费。

图2给出了从区块链到xFi再到元宇宙的技术层级关系。从社会属性来看,尽管去中心化自治组织(Decentralized Autonomous Organization, DAO)模式尚无成熟业态,但却为数字环境下的协作模式提供了新的思考。元宇宙的出现正是区块链技术、金融和社会属性发展的必然趋势,其持续性、实时性、开放性、兼容性、连接性、创造性、多样性等特点将会构建更多数字场景,也将推动建立以区块链为核心的Web3.0数字生态,在推动数字产业化的同时促进产业数字化的发展。

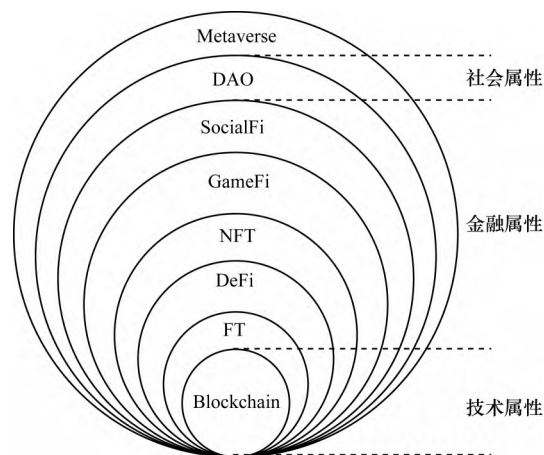


图2 以区块链为核心的元宇宙数字新生态

Fig.2 Digital new ecology of the Metaverse with Blockchain as its core

区块链基础设施通常可被分为五层架构,分别包含数据层、网络层、共识层、合约层和应用层<sup>[30-32]</sup>。数据层提供区块链数据的分布式存储架构,可对元宇宙生态的关键数据进行封装,提供防篡改机制。网络层使用网络协议构建了可靠的分发机制,为元宇宙生态参与者的点对点通信提供支持。共识层解决分布式场景的一致性,使更多相关方参与元

宇宙生态的治理。合约层为分布式编程赋能,使元宇宙中的各种资产可编程,更灵活地适应各种生态场景。应用层为区块链生态保驾护航,促进更多领域进入到元宇宙中。伴随区块链基础架构而来的是Web3.0时代。Web3.0为元宇宙中异构的分布式应用提供了通信基础、网络架构和交互模式。图3从各技术层级描绘了区块链技术在元宇宙中的应用。

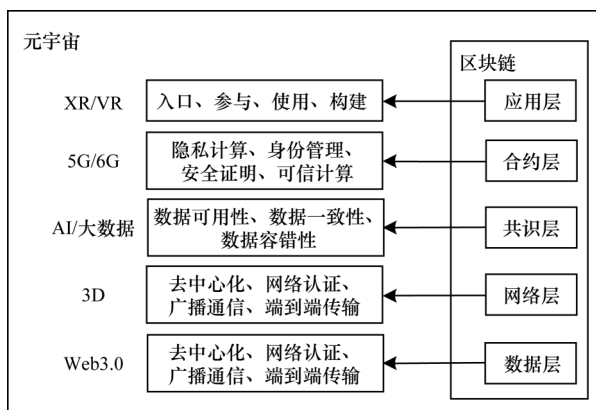


图3 区块链技术在元宇宙中的应用

Fig.3 Application of Blockchain technology in the Metaverse

区块链数据层涵盖数据结构、密码、编码学等多项计算机学科。通常地,区块链的交易使用默克尔树的形式被组织在每个区块中,树状结构有助于对叶子节点的访问,而默克尔树在此基础上增加了哈希验证技术。因此,可以快速查验地记录每个区块中的区块链交易。此外,区块构成了每个需要达成共识的单元,一旦形成共识后,区块的哈希值被其后继区块记录。哈希运算的抗碰撞性保证了区块链存储的不可篡改性。基于区块链不可篡改和可用的存储,形成了元宇宙的可信数据服务基础设施,为元宇宙中的身份、内容、资产和活动提供信任基础。

区块链网络层一方面借助传统的有线或无线通信信道,实现节点间的对等协商通道,保证了区块链系统的去中心化特性。另一方面,区块链构建的稳定的经过认证的点对点通信网络可以满足更加丰富的通信要求,比如广播协议、隐蔽通信、端到端传输等。因此,成熟的区块链网络可以满足元宇宙中各种各样的通信需求,使更多参与者可以在保护身份隐私的前提下进行点对点通信,避免用户隐私泄露的风险。

区块链共识层致力于解决传统分布式系统的数据一致性和容错性问题。分布式系统在保证数据可用性的同时,需要保证数据的一致性。拜占庭容错算法、工作量证明算法和权益证明算法等为区块链提供了丰富的共识协议思路。不同共识算法适用的场景不同,可以在分布式环境下,由元宇宙的参与者共同设定规则,共同确认系统的技术路线和商业模式,有效提升了用户参与的积极性。

区块链合约层从比特币的栈式脚本语言执行环境到以以太坊为代表的图灵完备编程环境,体现了

区块链正在支持所有的可计算操作。合约被分布式的节点反复执行和验证,体现了区块链的公开透明性,进而使得区块链具备可验证计算的服务。区块链合约层有效地解决了元宇宙中不同的应用需求,形成更多可编程的数字资产,扩大了元宇宙数字经济生态的规模,并为元宇宙社会的可信计算奠定了基础。

区块链应用层以数据层、网络层、共识层为理论支撑,以合约层为直接基础,提供用户界面友好的开放平台,为分布式应用、可信计算应用、价值互联互通提供接口。区块链应用层是普通用户接触、使用、参与构建元宇宙的入口。

### 3 基于区块链的元宇宙身份价值网络

#### 3.1 元宇宙中的身份要素

与现实的社会生态一样,组织、身份、资产、活动等4项关键要素将成为促进元宇宙健康发展的核心要素,其中身份作为元宇宙生态的关键要素,可以支撑组织、活动和资产要素,为元宇宙生态提供多样性的身份支持。区块链的技术、金融和社会属性可以丰富元宇宙的身份形式,帮助构建可信数字化价值交互网络。图4给出了元宇宙中组织、资产、活动三要素依托身份这一要素的关系结构。

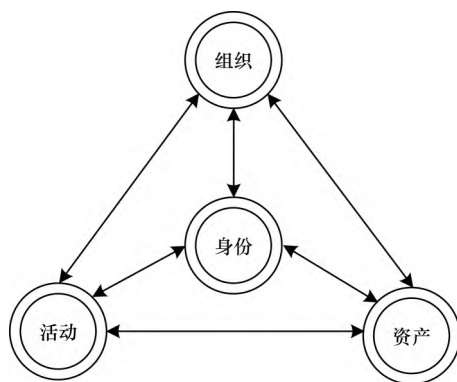


图4 元宇宙健康发展的核心要素

Fig.4 Core elements of the healthy development of the Metaverse

首先,传统互联网平台极易产生垄断型组织形式和商业模式,无论是Web1.0的网站,还是Web2.0更大场景的内容交互,均是平台占有绝对的优势,既控制着内容传播,也控制着基于内容产生的收益。尤其是Web2.0环境下,一旦形成平台生态,就会以平台作为工具从所有相关方获取高额收益。Web3.0的核心观点是用户和建设者共同拥有网络。在元宇宙中可能形成用户和建设者自治的组织形式,其组织规则在符合监管的前提下由程序代码来执行,这就需要利用区块链技术达到最大范围的共识,配合监管形成元宇宙的健康生态秩序。在数字环境中,物理世界的社会角色将会在数字环境中以数字形态存在,其变革将带来深远的影响,比如:在



物理环境下税务局承担关键的社会职能,在数字环境下虽然可以构建税务元宇宙,但其本质就是一段程序,在协作交易过程中自动完成税收程序。

其次,传统集中式身份验证模式极易产生安全威胁和隐私滥用问题,元宇宙不仅要能与真实的身份绑定,而且需要在不同应用场景、次元宇宙、元宇宙间切换,这就需要利用区块链技术建立新的分布式身份认证体系,可以在跨生态网络中保护隐私和数据安全。以虚拟数字人为例,每个元宇宙都会有独特的应用场景,但如果在每个元宇宙中都有不同的虚拟数字人将会为用户带来很大的困扰,极大增加监管复杂度。因此,需要通过区块链建立分布式身份体系,支持虚拟数字人在不同应用场景切换,以及虚拟数字人相关的静态属性、动态属性和资产随着虚拟身份同步切换。同时,从社会学视角来看,虚拟数字人是没有人身份的身份数字化形象,会带来很多使用权、运营权等问题,同时也将带来法律、伦理、资产、安全等一系列新的社会问题。区块链技术可以通过分布式账本和智能合约完成虚拟数字人的权利分配和责任制约。

再次,资产是物理世界和数字世界的核心要素,是促进经济循环的必要载体。在数字世界中,资产形态多种多样,可以是文字、视频、音频等数据资产以及游戏装备、影视作品、数字藏品、数字建筑等数字资产,也可以表现为股票、证券等金融资产,这些资产都可以表现为FT和NFT。只有具备以资产为核心的应用场景,才能发展成为可持续的生态,并且需要完成资产的确权,并进行资产的转移、交易和流通才能形成真正的经济体系。元宇宙中的道具、装备、UGC内容都需要以区块链为核心的元系统提供注册、登记、交换、交易等功能,区块链的技术属性将为资产提供存证、确权等支持,金融属性将为资产提供载体和表现形式,同时为基于资产的价值交换提供保障,社会属性的组织治理模式将加速数字资产在元宇宙中的交换和流通。

最后,元宇宙中的所有活动皆可收敛为数据,多元宇宙(元宇宙和元宇宙)之间、次元宇宙(元宇宙内不同应用)之间、元宇宙和外部设备间的数据交互过程,以及外部设备采集、存储、处理、分发、利用和处置个人行为数据的过程都需要区块链的技术来支持。Web2.0最大的问题是平台对用户数据的垄断和消费,平台在通过眼球经济汇聚用户数据的同时,通过广告、撮合等商业模式,独享用户数据和内容产生的价值。用户在平台上贡献内容和数据时,只能获得自身的认同感和微薄的收益。数据主权及其产生价值的回归正是Web3.0发展的目标,通过区块链技术可以建立分布式身份认证体系,使用户数据、内容和资产等附着于独立可控的身份链上,商业组织可以在用户的授权下获得相应的数据和内容,并支付等价的费用,从而从根本上解决Web2.0环境下的垄断型经济体系的问题,比如:文献[33]

实现了企业可以根据智能合约自动报税<sup>[33]</sup>;文献[34]提出基于区块链的分布式数据销售方案,分布式数据销售方案可以通过鼓励数据拥有者分发数据,实现大规模的数据聚合,进而改变医疗保健等领域的状况,并且该研究结合区块链和人工智能算法,提升数据检索的有效性和降低索引数据的泄漏风险。

### 3.2 以区块链为核心的密码学身份

在传统区块链系统中,用户身份是非对称密码学的公私钥对,这种假名身份有效地保护了用户个人隐私。在元宇宙社会中,除了普通的资产交易生成,还有各种丰富的资产交换和各种组织的活动记录,仅有密码学公私钥对已经不能满足元宇宙中对数据和资产的处理需求。

在采用公钥基础设施(Public Key Infrastructure, PKI)<sup>[35]</sup>后,公私钥与身份绑定的加密算法可以通过非对称密码算法实现。然而,PKI需要依赖权威中心,并且由该中心保管各用户的身份、数字证书、公钥等信息。与使用PKI相比,基于身份的密码体制作为密码原语,可以缓解权威中心的单节点故障问题,并简化密钥管理流程。文献[36]提出一种使用区块链的基于身份的密码系统,该系统将链中的节点拆分,分别完成用户身份验证和私钥保护。此外,为了防止网络攻击,还在识别过程中使用时间戳、随机数和哈希算法,确保该系统的正确性、安全性和性能效率。

基于属性的密码<sup>[37]</sup>进一步扩展了身份的含义,使得身份不再与唯一的字符串绑定,可以使用多种维度刻画用户,极大地扩展了非对称密码学的适用范围。文献[38]基于命名系统和属性密码提出安全、自治的身份管理系统reclaimID。由于属性密码在加密过程中使用秘密分享技术,因此在reclaimID中实现了访问控制层。属性密码的使用不仅使得授权访问成为可能,而且有效地保护了用户属性的隐私。此外,reclaimID作为去中心化的身份管理系统,需深入探讨去中心化的存储和网络机制的应用,并指出基于区块链或以区块链为核心的技术是其实现的关键。

解决元宇宙的身份问题有助于进一步实现元宇宙中的可信计算。隐私计算已经在金融、医疗、政务等领域有了一定的发展。这些领域主要解决了跨机构的数据采集和整合难的问题,降低了隐私数据容易泄漏的风险,克服了数据孤岛的问题。在元宇宙中,可信计算的实现有利于促进虚拟身份间的数据互联互通。

### 3.3 基于NFT的数据身份

传统的数字身份强调了个人从现实世界到虚拟世界的映射和绑定关系。以区块链和分布式账本技术为支撑的NFT数字资产凭证将身份的属性进一步赋予任意的数据和资产,不仅可以在元宇宙生态中实现万物互联和价值生成,而且能充分兼顾隐私性。NFT可以在区块链上永久保存交易历史,从而确保数字资产的唯一性。每个凭证都具有唯一可被识别的标识,这使其能够为数字资产鉴权。

文献[39]指出:沉浸在3D元宇宙中的互动将重新定义身份的概念,这种网络身份主要通过虚拟世界中的数字化身来实现。通过使用数字化身,物理世界的个人可以完成虚拟世界的创作、娱乐、社交、交易等诸多活动。基于区块链的NFT可以使数字化身无争议地完成资产、所有权的控制。

依据以下4种性质,基于NFT的数据身份构成了去中心化应用的基础:1)可验证性,NFT对应的数据和所有权能被任意第三方进行验证;2)透明性,有关NFT的活动,比如铸币、销售和采购均可在公开场合执行;3)可用性,NFT系统具备长时无干扰的可用特性;4)原子性,NFT交易在独立且具有一致性的原语中操作。

## 4 基于区块链的元宇宙经济金融体系

### 4.1 基于以太坊的元宇宙金融协议

以太坊作为智能合约平台能够运行各种去中心化的应用程序(DApp),核心在于支持语言图灵完备的以太坊虚拟机(Ethereum Virtual Machine, EVM),可执行复杂的控制逻辑。以太坊开发者提交的协议提案(Ethereum Request for Comment, ERC)<sup>[40]</sup>用以记录以太坊上各种开发标准、协议等细节。以太坊标准文件的种类包括Token标准(ERC20对应同质化通证,ERC721对应非同质化通证)、名字注册(ERC26、ERC13)、URI范式(ERC67)、Library/Package格式(EIP82)以及钱包格式(EIP75、EIP85)。

在以太坊的应用中,NFT与元宇宙的结合起步较早,具有代表性的案例包括CryptoKitties<sup>[41]</sup>和Decentraland<sup>[42]</sup>。CryptoKitties是一款基于区块链的虚拟宠物猫成长游戏,实质上是基于ERC721代币的DApp。CryptoKitties游戏用户在游戏世界范围内领养一只猫。虚拟猫数字资产具有稀缺性,包含唯一的独特识别价值,与现有的虚拟资产不同。基于点对点网络,NFT打造的数字资产被分发给各个参与者并存储,以证明所有权。Decentraland通过结合虚拟现实和区块链技术在元宇宙中实现了房地产的概念,使用ERC20代币MANA实现虚拟房地产的购买。用户在从Decentraland购买的土地上可以自由建造建筑物,通过在建筑物上安装广告牌或者收集稀有数字内容来开设展览赚取收入。

以太坊引入支持图灵完备的智能合约,使得复杂的业务可以在以太坊虚拟机中透明执行<sup>[43]</sup>。以太坊的出现促进了区块链应用由数字货币向加密货币的演进,实现市场和业务的各种区块链重构。基于区块链,DeFi能够促进元宇宙的去中心化市场和业务。

### 4.2 基于加密货币的元宇宙数字货币

数字货币是区块链赋能的主要应用之一<sup>[43]</sup>。广大用户的信任支撑了数字货币的价值体系,推动了数字货币的流通和交易。迄今为止,全球已发行超过12 000种数字货币,并且不断推出新的虚拟货币。

如同真实世界建立在法定货币上一样,未来的元宇宙不可避免地需要数字货币,以实现元宇宙中的货币流通、支付和结算功能。现在发展较为成熟的数字货币包括比特币和以太币,比特币<sup>[44]</sup>采用未使用的交易输出(Unspent Transaction Outputs, UTXO)交易模型来追踪比特币的使用情况,而以太坊<sup>[45]</sup>记录每个账户地址的余额,可以直接通过以太坊数据集工具(如Etherscan)查询。两种货币目前都采用PoW实现共识,矿工通过生成新区块来铸造数字货币。

元宇宙的用户需要交换不同的数字货币,以实现价值交换。数字货币的出现丰富了支付渠道,降低支付成本,提高了支付清算效率。然而,发行在公链上的数字货币与现实世界中的价值生产并无对应关系,投机泡沫成分较大。点对点交易的方式绕过国家金融机构监管,给洗钱等违法犯罪行为提供了可能<sup>[10]</sup>。因此,对于数字货币的监管方式需要创新,以保证数字货币在元宇宙中的合规流通。

在处理加密货币交易方面,多数加密货币交易发生在OKEx、Binance等中心化交易所。中心化交易所的优势在于低延迟交易和简单接口,也存在内部人员利用信息不对称操纵价格等弊端。在IDEX、Ether Delta等去中心化交易所中,智能合约或其他点对点网络自动执行交易<sup>[46]</sup>:一种模式是智能合约在链下维护连续有限的订单簿,订单的交易对手或交易所本身执行订单匹配并将订单提交给智能合约进行处理;另一种模式(如Uniswap和Bancor)是将智能合约作为交易对手执行并直接与其用户进行交易。

元宇宙中的交易具有数据量大、低确认延迟的特征<sup>[43]</sup>。一方面,元宇宙中会出现房地产购买、物品租赁等各种交易。在元宇宙中,交易涉及商品所有权转移和代币转移。用户在传统区块链上发起交易,该交易将首先广播给各节点,并存储在各节点本地交易池中。各节点获取一定数量的交易,然后执行共识机制。由于体量庞大的用户群体和各种DApp,元宇宙中的区块链节点将产生大量交易数据。如果对所有节点要求存储所有历史交易存储,会给全网节点带来极大负载。另一方面,元宇宙交易要求全网实现低确认延迟。为了满足人类对互联网应用“即时响应”的要求,端到端的延迟需要在几十毫秒到几百毫秒之间。在VR/AR/MR/XR等应用环境下,基于三维显示和交互的元宇宙应用要求延迟控制在10 ms内,以避免用户产生眩晕。

### 4.3 基于NFT的元宇宙数字资产

目前,虚拟世界的主要经济活动为虚拟资产拍卖,包括土地、稀缺物品、珍贵不动产、土地的开发和租赁、游戏任务的奖励以及投资加密货币的利润。因此,元宇宙中诞生了一种新的融资形式NFT,其可以连接现



实世界和虚拟世界。NFT主要用于数字资产交易,通过在区块链上永久保存加密的交易历史确保其唯一性。每个代币有唯一的TokenID,可验证数字资产的所有权。因为在元宇宙这样的三维空间中,社会和经济活动像现实一样运行,需要有相关技术实现资产权属证明和价值互换。NFT在元宇宙中支持交易双方之间的调解和互动,因此在元宇宙中得到迅速发展。以NFT为纽带,元宇宙构建了一套虚拟世界的社会契约。由于NFT的唯一性和不可分割性,因此元宇宙中的参与者可以有效声明其著作权和所有权。

在NFT的基础上,文献[47]提出了非同质化权益(Non-Fungible Right, NFR),进一步探索和扩展了虚拟资产的用途和边界,并指出目前NFT违反了国内相关监管要求,存在潜在金融监管风险、缺乏法律监管等问题。因此,该研究提出的NFR以非公有区块链为基础,完善了实名化身份管理机制并解决了上述问题。NFR有望实现物理与虚拟环境的结合,助力实体经济和数字经济发展。

从广义上来看,数字资产是元宇宙生态的关键要素<sup>[48]</sup>,数字资产既包括存储和处理信息的硬件,又包括涵盖音视频、文本、图像、软件等在内的可复制信息,并且提供了数字凭证。数字凭证既可以是虚拟世界的数字权益证明,比如数字化身和个人签名,又可以是现实世界实物的唯一证明,比如房产、艺术品、股票、期权等。由于数字凭证架起了虚拟世界和现实世界的桥梁,因此元宇宙的数字资产管理模式将反向推动现实世界对法律和技术的重新审视,进一步重塑世界运行的底层逻辑。

## 5 未来展望

元宇宙将成为下一代互联网的重要数字生态环境,区块链等新一代信息技术的集成架构将成为元宇宙重要的基础设施,因此后续需要在元宇宙硬件、系统、应用等方面的研究:

1)在硬件层面,元宇宙不是在Web2.0的基础上的三维化,而是将Web2.0嵌入到Web3.0中,这将改变现有计算机外设的整个生态,显示器、键盘、鼠标等计算机相关设备将逐步被增强现实操作系统和感官触达设备等新型人机交互设备替代,形成新的操作和交互模式,这将对现有人机交互体系造成颠覆性的影响。

2)在系统层面,传统操作系统重点面向进程和消息,主要作用是调度基础设施资源,无法响应海量数据环境下的存储、运算、处理等需求,需要集成区块链的共识和激励机制、人工智能深度学习、大数据处理框架等各项技术的关键组件形成面向数据和资产的操作系统,新型操作系统的出现将推动形成新的产业格局,将会颠覆现有信息技术生态环境。

3)在应用层面,元宇宙可以将社交游戏、文化旅游、休闲娱乐等场景移植到数字环境中,通过三维展

现和沉浸式的场景将更多用户从物理世界拉到数字世界中,形成更具黏性的数字生活场景,这种新型社会范式将颠覆传统的组织形式和协作模式,并对人类的生活方式造成巨大影响,甚至创造新型的数字化世界图景。

因此,在未来的研究中,亟需跳出当前信息技术框架和思维模式,在工程应用前强化本体论和认识论研究,突出社会设计的重要性,重点分析元宇宙对社会组织形式和协作模式、社会生态和意识形态的影响,夯实理论和逻辑基础。

## 6 结束语

元宇宙将推动数字环境下的技术探索、应用创新和产业构建,促进信息消费形成数字经济的新生态。针对元宇宙产业缺乏概念共识、关键技术不明确、技术体系模糊等问题,本文依据本体论提出元宇宙的概念,分析元宇宙相关技术体系,并重点阐述基于区块链元宇宙的基础设施、身份价值网络、数字治理架构和经济金融体系,明确区块链是元宇宙的核心基础设施。在未来工作中将构建标准的元宇宙概念和术语体系,在工业和商业元宇宙场景中探索元宇宙技术体系的集成方法,共同协作创建元宇宙的分布式商业应用场景。

## 参考文献

- [1] WANG H M, ZHENG Z B, XIE S A, et al. Blockchain challenges and opportunities: a survey [J]. International Journal of Web and Grid Services, 2018, 14(4): 352-375.
- [2] LIU Z T, XIANG Y X, SHI J, et al. Make Web3.0 connected[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9428608>.
- [3] 袁园, 杨永忠. 走向元宇宙: 一种新型数字经济的机理与逻辑[J]. 深圳大学学报(人文社会科学版), 2022, 39(1): 84-94.  
YUAN Y, YANG Y Z. Embracing the Metaverse: the mechanism and logic of a new digital economy[J]. Journal of Shenzhen University (Humanities & Social Sciences), 2022, 39(1): 84-94. (in Chinese)
- [4] WRIGHT M, EKEUS H, COYNE R, et al. Augmented duality: overlapping a Metaverse with the real world[C]// Proceedings of 2008 International Conference in Advances on Computer Entertainment Technology. New York, USA: ACM Press, 2008: 263-266.
- [5] DAVIS A, MURPHY J, OWENS D, et al. Avatars, people, and virtual worlds: foundations for research in Metaverses[J]. Journal of the Association for Information Systems, 2009, 10(2): 90-117.
- [6] KINSNER W. Digital twins for personalized education and lifelong learning [C]// Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [7] Acceleration Studies Foundation. Metaverse roadmap overview [EB/OL]. [2022-02-03]. <https://www.metaverseroadmap.org/overview/>.
- [8] 李默. 元宇宙视域下的智慧图书馆服务模式与技术框架研究[J]. 情报理论与实践, 2022, 45(3): 89-93, 88.



- LI M. Research on service mode and technical framework of smart library from the perspective of Metaverse[J]. Information Studies; Theory & Application, 2022, 45(3): 89-93, 88. (in Chinese)
- [9] 方凌智, 沈煌南. 技术和文明的变迁——元宇宙的概念研究[J]. 产业经济评论, 2022(1): 5-19.
- FANG L Z, SHEN H N. Conceptualizing Metaverse; a perspective from technology and civilization[J]. Review of Industrial Economics, 2022(1): 5-19. (in Chinese)
- [10] DIONISIO J, BURNS W G, GILBERT R. 3D virtual worlds and the Metaverse: current status and future possibilities[J]. ACM Computing Surveys, 2013, 45: 34: 1-34: 38.
- [11] ENO J, GAUCH S, THOMPSON C. Searching for the Metaverse[C]//Proceedings of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. New York, USA: ACM Press, 2009: 223-226.
- [12] EGLISTON B, CARTER M. Critical questions for Facebook's virtual reality: data, power and the Metaverse[J]. Internet Policy Review, 2021, 10(4): 1-10.
- [13] CHESLACK-POSTAVA E, AZIM T, MISTREE B F T, et al. A scalable server for 3D Metaverses[C]//Proceedings of 2012 USENIX Annual Technical Conference. [S. l.]: USENIX, 2012: 209-222.
- [14] SÉBASTIEN D, CONRUYT N, COURDIÉ R, et al. Generating virtual worlds from biodiversity information systems: requirements, general process and typology of the Metaverse's models[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Internet and Web Applications and Services. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 549-554.
- [15] RYSKELDIEV B, OCHIAI Y, COHEN M, et al. Distributed Metaverse: creating decentralized blockchain-based model for peer-to-peer sharing of virtual spaces for mixed reality applications[C]//Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference. New York, USA: ACM Press, 2018: 1-3.
- [16] MATSUBARA M, OGUCHI M. Evaluation of Metaverse server in a widely-distributed environment[C]//Proceedings of 2010 International Conference on the Move to Meaningful Internet Systems. Berlin, Germany: Springer, 2010: 307-316.
- [17] HYUN J. A study on education utilizing Metaverse for effective communication in a convergence subject[J]. International Journal of Internet, Broadcasting and Communication, 2021, 13(4): 129-134.
- [18] YOO G S, CHUN K. A study on the development of A game-type language education service platform based on Metaverse[J]. Journal of Digital Contents Society, 2021, 22(9): 1377-1386.
- [19] BARRY D M, OGAWA N, DHARMAWANS A, et al. Evaluation for students' learning manner using eye blinking system in Metaverse[J]. Procedia Computer Science, 2015, 60: 1195-1204.
- [20] CHOI H S, KIM S H. A content service deployment plan for Metaverse museum exhibitions—centering on the combination of beacons and HMDs[J]. International Journal of Information Management, 2017, 37(1): 1519-1527.
- [21] JEONG H, YI Y, KIM D. An innovative E-commerce platform incorporating Metaverse to live commerce[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2022, 18(1): 221-229.
- [22] KAPPE F, STEURER M. The Open Metaverse Currency (OMC)—a micropayment framework for open 3D virtual worlds[M]. Berlin, Germany: Springer, 2010.
- [23] LU Q H, XU X W, LIU Y, et al. uBaaS: a unified blockchain as a service platform[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 101: 564-575.
- [24] BUTERIN V. Chain interoperability[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://download.csdn.net/download/caroar/12175215>.
- [25] GAI K K, WU Y L, ZHU L H, et al. Permissioned blockchain and edge computing empowered privacy-preserving smart grid networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7992-8004.
- [26] DUNPHY P, PETITCOLAS F A P. A first look at identity management schemes on the blockchain[J]. IEEE Security & Privacy, 2018, 16(4): 20-29.
- [27] DI PIERRO M. What is the blockchain?[J]. Computing in Science & Engineering, 2017, 19(5): 92-95.
- [28] WERNER S M, PEREZ D, GUDGEON L, et al. SoK: Decentralized Finance (DeFi)[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://arxiv.org/abs/2101.08778v1>.
- [29] DOWLING M. Is non-fungible token pricing driven by cryptocurrencies?[J]. Finance Research Letters, 2022, 44: 102097.
- [30] 蔡晓晴, 邓尧, 张亮, 等. 区块链原理及其核心技术[J]. 计算机学报, 2021, 44(1): 84-131.
- CAI X Q, DENG Y, ZHANG L, et al. The principle and core technology of blockchain[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(1): 84-131. (in Chinese)
- [31] 张亮, 刘百祥, 张如意, 等. 区块链技术综述[J]. 计算机工程, 2019, 45(5): 1-12.
- ZHANG L, LIU B X, ZHANG R Y, et al. Overview of blockchain technology[J]. Computer Engineering, 2019, 45(5): 1-12. (in Chinese)
- [32] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
- YUAN Y, WANG F Y. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494. (in Chinese)
- [33] VISHNEVSKY V P, CHEKINA V D. Robot vs. tax inspector or how the fourth industrial revolution will change the tax system: a review of problems and solutions[J]. Journal of Tax Reform, 2018, 4(1): 6-26.
- [34] ZHOU J Y, TANG F Y, ZHU H, et al. Distributed data vending on blockchain[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 1100-1107.
- [35] BERKOVITS S, CHOKHANI S. Public key infrastructure study: final report[EB/OL]. [2022-02-03]. <http://femto-second.com/Documents/NIST-Mitre-PKI-Study-1994.pdf>.
- [36] ZHOU B N, LI H, XU L. An authentication scheme using identity-based encryption & blockchain[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 556-561.
- [37] BETHENCOURT J, SAHAI A, WATERS B. Ciphertext-policy attribute-based encryption[C]//Proceedings of IEEE Symposium on Security and Privacy. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 321-334.

(下转第41页)

- [14] LU Y L, HUANG X H, DAI Y Y, et al. Blockchain and federated learning for privacy-preserved data sharing in industrial IoT [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(6): 4177-4186.
- [15] QU Y Y, GAO L X, LUAN T H, et al. Decentralized privacy using blockchain-enabled federated learning in fog computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5171-5183.
- [16] WENG J S, WENG J, ZHANG J L, et al. DeepChain: auditable and privacy-preserving deep learning with blockchain-based incentive [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2021, 18(5): 2438-2455.
- [17] SHARMA P K, PARK J H, CHO K. Blockchain and federated learning-based distributed computing defence framework for sustainable society[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 59: 102220.
- [18] ZHAO W J. Blockchain technology: development and prospects[J]. National Science Review, 2019, 6(2): 369-373.
- [19] XIE C, KOYEJO S, GUPTA I. Asynchronous federated optimization[EB/OL]. [2022-02-01]. <https://arxiv.org/abs/1903.03934>.
- [20] JIANG Y H, KONEČNÝ J, RUSH K, et al. Improving federated learning personalization via model agnostic meta learning[EB/OL]. [2022-02-01]. <https://arxiv.org/abs/1909.12488>.
- [21] LI T, SAHU A K, ZAHEER M, et al. Federated optimization in heterogeneous networks [C]//Proceedings of IEEE Symposium on Machine Learning and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2020: 429-450.
- [22] ZHANG M, SAPRA K, FIDLER S, et al. Personalized federated learning with first order model optimization[EB/OL]. [2022-02-01]. <https://arxiv.org/abs/2012.08565>.
- [23] GAO S, YU T Y, ZHU J M, et al. T-PBFT: an EigenTrust-based practical Byzantine fault tolerance consensus algorithm [J]. China Communications, 2019, 16(12): 111-123.
- [24] 孙嘉豪, 孟翔斯, 张浩运, 等. 基于改进PBFT的区块链知识产权保护模型[J]. 计算机工程, 2020, 46(12): 134-141.
- [25] SUN J H, MENG X S, ZHANG H Y, et al. Intellectual property protection model using blockchain based on improved PBFT[J]. Computer Engineering, 2020, 46(12): 134-141. (in Chinese)
- [26] 谭敏生, 杨杰, 丁琳, 等. 区块链共识机制综述[J]. 计算机工程, 2020, 46(12): 1-11.
- [27] TAN M S, YANG J, DING L, et al. Review of consensus mechanism of blockchain[J]. Computer Engineering, 2020, 46(12): 1-11. (in Chinese)
- [28] 王兵, 李辉灵, 牛新征. 基于综合选举的DPoS共识算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(6): 50-56.
- [29] WANG B, LI H L, NIU X Z. DPoS consensus algorithm with comprehensive election[J]. Computer Engineering, 2022, 48(6): 50-56. (in Chinese)
- [30] NGUYEN T, KIM K. A survey about consensus algorithms used in Blockchain[J]. Journal of Information Processing Systems, 2018, 14(1): 101-128.
- [31] MIKAVICA B, KOSTIĆ-LJUBISAVLJEVIĆ A. Blockchain-based solutions for security, privacy, and trust management in vehicular networks: a survey [J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(9): 9520-9575.

编辑 索书志

(上接第32页)

- [38] SCHANZENBACH M, BRAMM G, SCHÜTTE J. reclaimID: secure, self-sovereign identities using name systems and attribute-based encryption [C]//Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications/12th IEEE International Conference on Big Data Science and Engineering (TrustCom/BigDataSE). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 946-957.
- [39] DALGARNO B, LEE M J W. What are the learning affordances of 3-D virtual environments?[J]. British Journal of Educational Technology, 2010, 41(1): 10-32.
- [40] Ethereum improvement proposals[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://eips.ethereum.org/erc>.
- [41] CryptoKitties. CryptoKitties white paper[EB/OL]. [2022-02-03]. [https://drive.google.com/file/d/1ikZHnJX\\_yaCHmjmAb5qubaDFREMx1F6PK/view](https://drive.google.com/file/d/1ikZHnJX_yaCHmjmAb5qubaDFREMx1F6PK/view).
- [42] Decentraland. Metaverse property[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://metaverse.properties/buy-indecentraland>.
- [43] YNAG Q, ZHAO Y T, HUANG H W, et al. Fusing blockchain and AI with Metaverse: a survey[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://arxiv.org/abs/2201.03201>.
- [44] Bitcoin for businesses[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://bitcoin.org/en/bitcoin-for-businesses>.
- [45] Ethereum. Welcome to Ethereum[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://ethereum.org/en/>.
- [46] DAIAN P, GOLDFEDER S, KELL T, et al. Flash Boys 2.0: frontrunning in decentralized exchanges, miner extractable value, and consensus instability [C]//Proceedings of IEEE Symposium on Security and Privacy. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2020: 910-927.
- [47] 证券日报. 非同质化权益(NFR)白皮书[EB/OL]. [2022-02-03]. <http://www.zqrb.cn/jrjg/hlwjr/2021-10-15/A1634263431812.html>.
- [48] DUAN H H, LI J Y, FAN S Z, et al. Metaverse for social good: a university campus prototype [C]//Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia. New York, USA: ACM Press, 2021: 153-161.

编辑 陆燕菲