计算机研究与发展
Journal of Computer Research and Development
DOI: 10.7544/issn1000-1239.202330074
61(9): 2364−2383, 2024

基于区块链的元宇宙生态体系架构

李　鸣[1,2,3]　宋文鹏[1,2]　宗　燕[4]　刘冕宸[3]
[1](复旦大学计算机科学技术学院　上海　200433)
[2](上海区块链工程技术研究中心(复旦大学)　上海　200433)
[3](中国电子技术标准化研究院　北京　100007)
[4](中国中医科学院西苑医院　北京　100091)
(13701388822@139.com)

Blockchain Based Metaverse Ecosystem Achitecture

Li Ming[1,2,3], Song Wenpeng[1,2], Zong Yan[4], and Liu Mianchen[3]
[1](*School of Computer Science*, *Fudan University*, *Shanghai* 200433)
[2](*Shanghai Engineering Research Center of Blockchain* (*Fudan University*), *Shanghai* 200433)
[3](*China Electronics Standardization Institute*, *Beijing* 100007)
[4](*Xiyuan Hospital of China Academy of Chinese Medical Sciences*, *Beijing* 100091)

Abstract　The metaverse has emerged as a ubiquitous buzzword in the industry, with various sectors eagerly anticipating its potential to unlock forth new opportunities and foster exponential growth, and to serve as a driving force and powerful engine for the digital economy. However, there is a wide divergence of understanding regarding the metaverse across different domains and aspects. This paper aims to provide a framework for a systematic understanding and scientific research of the metaverse through a multidimensional approach. Firstly, we analyze several mainstream metaverse architectural frameworks and their pivotal components, revealing the intricate and multilayered structure of the metaverse. Secondly, we furnish a framework for a meticulous comprehension of metaverse, and propose the metaverse ecosystem architecture, elaborate on the requirements of various levels including the technology system, content system, economic system, collaboration system, and governance system, as well as highlight their interrelationships, and thereby construct the entire metaverse ecosystem. Furthermore, we place special emphasis on the analysis of the crucial role of blockchain technology within the metaverse, particularly underscoring its value in supporting data, digital assets, and collaboration. This study aims to provide a sturdy theoretical foundation and practical guidance for the future development of the metaverse field.

Key words　blockchain; metaverse; metaverse ecosystem; metaverse content system; metaverse economy system; metaverse governing system

摘　要　当前,元宇宙已经成为产业热词,产业各界期待元宇宙能够带来新的机会和增长点,成为推动数字经济的动力和引擎.然而,各界对元宇宙的认识存在广泛差异.通过多角度的研究,旨在为元宇宙的系统性理解和科学研究提供框架.首先,分析了多个主流元宇宙体系架构及其关键组件,揭示了元宇宙的多层次结构.其次,提出了元宇宙生态体系架构,详细阐述了技术系统、内容系统、经济系统、协作系统和治

收稿日期: 2023-04-03; **修回日期**: 2023-11-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2101703); 国家自然科学基金项目(U19A2066); 上海市科技创新行动计划项目(20511102200, 20222420800)
This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFB2101703), the National Natural Science Foundation of China (U19A2066), and the Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan (20511102200, 20222420800).
通信作者: 刘冕宸(13511014509@163.com)

理系统各层级的要求，以及它们之间的相互关系，构建了整个元宇宙的生态体系. 此外，着重分析了区块链技术在元宇宙中的重要作用，特别强调了其在数据、资产和协作支持方面的价值. 该研究旨在为元宇宙领域的未来发展提供有力的理论基础和实践指导.

关键词 区块链；元宇宙；元宇宙生态体系；元宇宙内容系统；元宇宙经济系统；元宇宙治理系统

中图法分类号 TP391

2022 年元宇宙发展迅速，在 Facebook 公司将其改名为 Meta 掀起元宇宙浪潮后，中国、美国、英国、韩国、日本等国家都在推动或重点关注元宇宙的发展. 福布斯、Gartner、普华永道等国际知名组织也通过乐观的数据来憧憬元宇宙的未来，国际电工委员会（International Electro Technical Commission, IEC）[1]、电气与电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）[2]、元宇宙标准论坛（Metaverse Standards Forum, MSF）[3]、Web3.0 开放元宇宙联盟（Open Metaverse Alliance for Web3, OMA3）[4]等组织也都在启动元宇宙标准化相关研究. NVIDIA[5] 的 Ominiverse、Microsoft[6] 收购的暴雪、Unity[7] 的制作引擎等国际巨头的产品和服务也纷纷入局，从不同领域进入到元宇宙产业中，旨在前瞻下一个互联网的制高点.

元宇宙在我国也受到政府和产业界的重视，迄今为止，上海发布《上海市培育“元宇宙”新赛道行动方案（2022—2025 年）》[8]、浙江发布《浙江省元宇宙产业发展行动计划（2023—2025 年）》[9]、河南发布《河南省元宇宙产业发展行动计划（2022—2025 年）》[10]，多个地方政府已经发布了近 20 个元宇宙支持政策. 据不完全统计，各地规划元宇宙产业规模在 8 500 亿以上.

在科研领域，清华大学[11]、北京大学[12]、浙江大学[13] 等 20 多个研究机构和高校启动元宇宙研究，在关键技术、应用场景等方面提出了有建设性的建议. 中国电子技术标准化研究院牵头成立了中国电子工业标准化技术协会元宇宙工作委员会[14]、中国信息通信研究院牵头成立了元宇宙创新探索方阵[15]，其他机构先后成立了 30 余个元宇宙相关联盟组织，分别在标准化、产业等方面开展研究，为元宇宙产业发展奠定了研究基础.

在应用方面，工商银行在金融、国网在能源、南钢在制造领域纷纷推出元宇宙场景，探索元宇宙在不同领域的应用. 尤其在互联网领域，百度公司的希壤[16]、网易公司的瑶台[17]、蚂蚁的鲸探[18] 等元宇宙相关产品和服务纷纷进入产业，为用户提供元宇宙平台服务，让更多用户能够深切地感受到元宇宙的沉浸式体验和数字资产.

当前，很多专家对元宇宙的概念给出了大体的描述，但都是从元宇宙的作用或意义上进行解释，没有从本质上说明元宇宙到底是什么. 文献 [19] 给出了比较全面的总结：元宇宙是以区块链为核心的 Web3.0 数字新生态. 以区块链为核心的数字科技可以推动信息技术服务，从而促进数字产业化；元宇宙可以创造和创新更广泛的应用场景，拉动信息消费促进产业数字化. 因此，以区块链为核心的 Web3.0 技术体系推动形成的元宇宙数字生态，将对数字产业化和产业数字化提供有力推动，为数字经济高质量发展打造新引擎.

虽然元宇宙将在新一代信息技术的集成创新下必将推动形成新的信息消费[19] 生态，成为数字经济新引擎，但由于行业参与者众多，业务形态也多种多样，当前仍存在诸多问题. 一是未形成元宇宙的统一共识，社会各界专家纷纷根据自身的理解，提出对元宇宙的理解和认识，缺乏统一标准化的定义[20]；二是未形成统一的产业或生态体系架构模型，相关企业推出局部元宇宙产品或服务，未能达到元宇宙的实际效果；三是缺乏技术体系参考架构，底层关键技术组件不完善，各相关方独立研发元宇宙产品或服务，将加大产业摩擦成本；四是新业态新模式存在监管合规风险，针对元宇宙数据安全、金融监管和科技伦理问题缺少核心规则制定，对元宇宙未来发展造成影响.

从长期来看，元宇宙与现实世界有着无法割断的联系，元宇宙发展必然要受到现实世界法律、物理定律、技术发展和伦理道德等现状的影响，为保障元宇宙建设长期可持续发展，需逐步夯实支撑技术，突破理论研究，以内容创建和生成为核心动能，探索经济交易、多方协作方式，通过制定规则与治理，建立元宇宙生态.

为此，我们开展了元宇宙生态体系架构研究，并依据区块链技术的特点，分析区块链对元宇宙生态组成部分的支撑作用. 本文的主要贡献包括 3 个方面：

1）研究了多个主流元宇宙体系及关键组件，并

对每个架构进行充分的分析，分别给出了其优势和存在的问题，为提出新的体系架构做了充分准备.

2)提出了一种元宇宙生态体系架构，通过层次化分析元宇宙生态的各个层级，明确元宇宙的技术系统、内容系统、经济系统、协作系统和治理系统的具体要求.

3)通过分析区块链技术的特性和元宇宙生态体系架构的特点，明确区块链对于元宇宙生态体系架构各个层次的支持，突出区块链技术在元宇宙中的价值.

1 相关工作

从2021年6月起，我们开始关注元宇宙技术和产业情况，先后对国内外元宇宙产业进行了充分的分析，并聚焦标准化开展了深入的研究，迄今为止已经组建IEC SEG15①, IEEE C/MSG②, CESA-MC③等多个国际组织，同时开展《元宇宙参考架构》等国际、国家和团体标准研究，发布了《链接元宇宙：研究与探索》等研究成果.

本文通过介绍元宇宙国内外产业情况，分析当前元宇宙生态的主要架构、模型和体系，发现元宇宙生态的关键核心组件和主要体系架构，结合区块链的可信、共识和防篡改的技术特点，利用体系化和结构化的方法，提出基于区块链技术的元宇宙生态体系，可以起到4个作用：

1)强化生态体系的的系统性，帮助理解和认识元宇宙；

2)形成结构化的层次和视角，支持开展元宇宙标准化研究；

3)以参考架构模型为依据，开展可落地的工程化实践；

4)合理规划生态体系，引导产业健康发展和有序实践.

2 当前元宇宙发展情况

当前，元宇宙发展还处于初期，虽然国内外巨头纷纷进入元宇宙产业，但各家都是基于自身的传统优势构建元宇宙的生态体系，产业中没有形成统一的生态体系参考模型，这种情况大大提升了进入产业的门槛和成本.

Jung等人[21]将元宇宙生态分为基础设施、设备、内容和平台等体系，如图1所示. 其中，基础设施包括通信、物联网、人工智能，设备层包括XR、可穿戴设备等，内容层包括游戏、数字娱乐、虚拟人等，平台层包括服务平台、部署平台和开发平台等. 此种分层方式基本覆盖当前元宇宙的大部分内容，尤其是引入了内容系统，为相关生态提供更合理的发展空间. 但是在此架构中，未能考虑到Roblox[22]和Sandbox[23]等元宇宙平台的经济体系. 元宇宙作为数字经济的新动力，应该具有自经济体系，因此需要融入经济系统，形成可持续发展的生态.

关键组成		龙头公司及应用场景
元宇宙下层基础	5G/6G、NFT、D.N.A.、物联网等	英伟达、微软、亚马逊、谷歌、三星等
元宇宙设备	XR (VR/AR/MR)、智能指环、VR手套、VR眼镜、手腕、触觉套装等	苹果 (VR手套)、微软 (HoloLens)，谷歌 (眼镜)、Meta (Oculus)等
元宇宙内容	XR (VR/AR/MR)、智能指环、VR手套、VR眼镜、手腕、触觉套装等	个人: 生产并销售各种内容 商业: 研讨会、表演、会议等
元宇宙平台	游戏、电子时尚、交易、Avatar、服饰、社交、广告、表演、公共服务、教育等	服务平台: Roblox, Fortnite, Horizon等 发展平台: Unity、Unreal、英伟达 手机AR发展: 谷歌ARCore、AppleARKit

Fig. 1 Sang Hee Jung metaverse

图1 Sang Hee Jung元宇宙

Park等人[24]将元宇宙生态分为硬件、软件和内容，如图2所示. 其中硬件包括手持设备、动作捕捉设备等，软件包括目标识别、语音识别等，内容包括个人代理、场景生成和评估、多模态内容表现等. 这

① IEC(国际电工委员会)元宇宙标准化评估组.

② IEEE(电气与电子工程师协会)计算机协会元宇宙研究组.

③ 中国电子工业标准化技术协会元宇宙工作委员会.

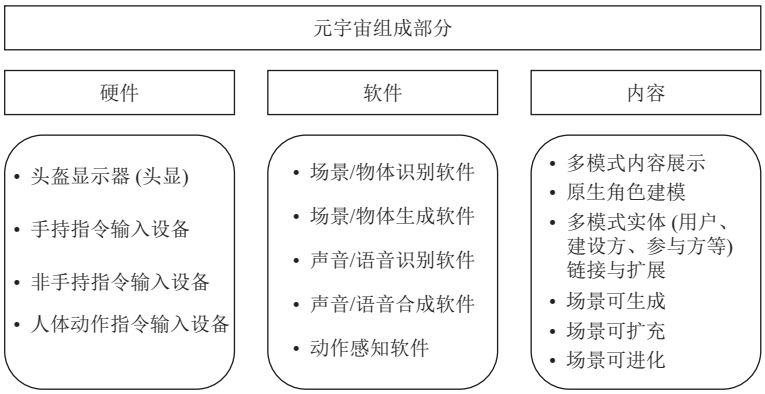


Fig. 2 Sang-Min Park metaverse

图 2 Sang-Min Park 元宇宙

种作法重点突出了元宇宙的外部设备、内容创作和空间计算等显著特点，可以帮助相关方快速了解元宇宙与传统系统的区别.

但是，这种仅考虑到元宇宙在信息技术上的新增部分，以往各项技术的独立发展路线缺乏完整生态的支持，需要更大、更聚焦的概念和场景拉动新一代信息技术进一步融合，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. 元宇宙基于区块链等新一代信息技术实现元宇宙持续运转与价值最大化，忽略了新一代信息技术集成创新对元宇宙的支撑作用，很容易让相关方将元宇宙看成简单的内容创作和交互感知平台，极大地降低了其他组件在生态体系中的协同作用. 同时，该设计也未能涵盖必要的经济系统，影响了元宇宙生态在创新模式上的想象空间.

Wang 等人[25]在教育元宇宙方面做了研究和探索，如图 3 所示. 该研究将教育元宇宙分为基础设施和业务行业、技术资产和设备、用户权利和数据安全隐私保护[26]、教学设计和表现技术、研究和技术中心、知识中心、训练中心等重要组件，其中后面 4 个可以纳入到教育行业的业务层，前 3 个对元宇宙生态表述过于抽象和宏观，无法对具体实践给出指导性方向. 但是，该研究中提出元宇宙生态中的用户权利，将用户纳入，体现了生态的思想，对行业内的元宇宙生态体系研究是个重要的启发.

Gupta 等人[27]提出元宇宙零信任(Zero Trust)架构模型，将元宇宙分为 4 层，如图 4 所示. 该研究包括 0 层负责身份评估，包括用户、业务实体和第三方服务的身份；1 层负责身份管理和授权，包括设备 ID、企业 ID、目标 ID 等；2 层是访问管理和控制，包括设备、用户和服务等访问策略；3 层是基于区块链的信任管理，包括感知网络、计算引擎、规则引擎、去中

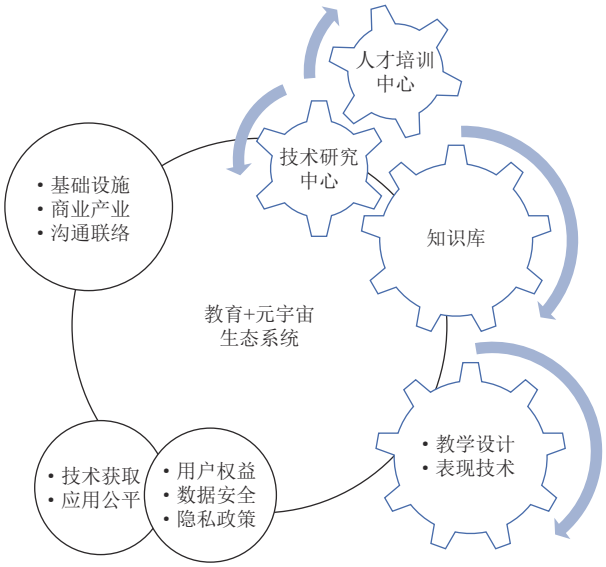


Fig. 3 Minjuan Wang metaverse

图 3 Minjuan Wang 元宇宙

心化预言机等. 此种结构创新性地将零信任融入到生态中，尤其是定位在身份认证的核心问题上，为元宇宙的治理体系研究提供了基础. 但是，在元宇宙生态体系尚未确定的前提下，零信任架构必定会受到元宇宙体系架构演进的影响，从而无法构建有效的元宇宙零信任体系.

Jon Radoff[28]将元宇宙分为 7 层体系，如图 5 所示包括体验、探索、创作者经济、空间计算、去中心化、人机交互、基础设施. 这 7 层体系将创作者经济单独提炼出来，形成独立的一层，突出了内容和经济在元宇宙生态体系中的重要性，让更多相关者可以感受到元宇宙不仅是“3D 游戏”，还能够形成价值网络和产业生态. 但是，该设计中的体验和发现更偏向于人文的表达，虽然在细节中描述了不同场景，但没有揭示其内在联系和相互关系，很难对真实的工程实践有实际的指导意义.



Fig. 4 Zero Trust metaverse

图 4 Zero Trust 元宇宙

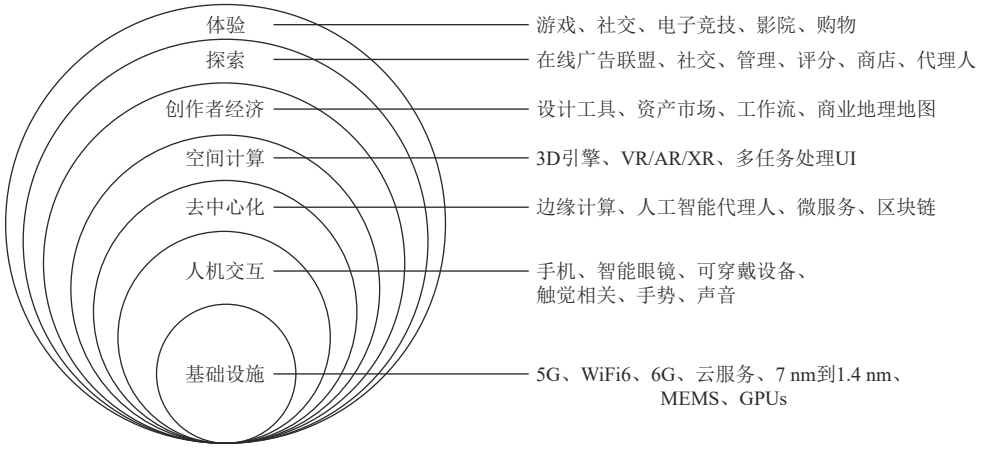


Fig. 5 Jon radoff metaverse

图 5 Jon radoff 元宇宙

Gartner[29] 给出了元宇宙的关键要素，如图 6 所示包括数字货币、数字商业、NFTs、基础设施、设备独立性、游戏、数字资产、社交和娱乐、电子商务、社交媒体、数字人、自然语言处理等. 数字资产、数字货币、数字人的引入，更明确地突出了元宇宙生态体系的核心价值，具有价值载体和数字人物呈现的元宇宙更能让用户获得沉浸式和真实世界的感受. 但是，Gartner 的关键要素将应用、资产、商业模式、基础设施等混杂在一起，可以从不同维度进一步梳理，形成体系化的层次结构，以表现元宇宙的本质.

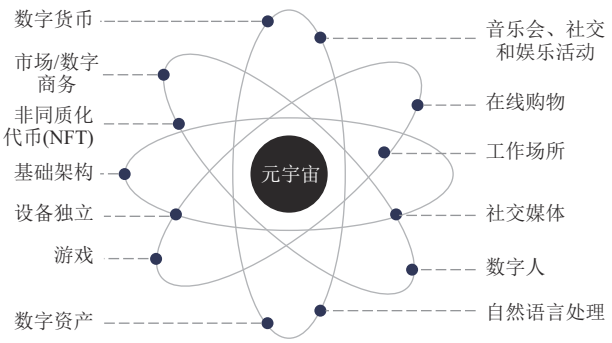


Fig. 6 Gartner metaverse

图 6 Gartner 元宇宙

德勤(Deloitte)[30] 给出了元宇宙的 4 层架构，如图 7 所示包括技术基础设施、技术平台和引擎、应用和访问. 其中技术基础设施包括互联网、物联网、云计算、本地和无线通信网络，技术平台和引擎包括数字孪生、人工智能、区块链、游戏引擎、空间计算和

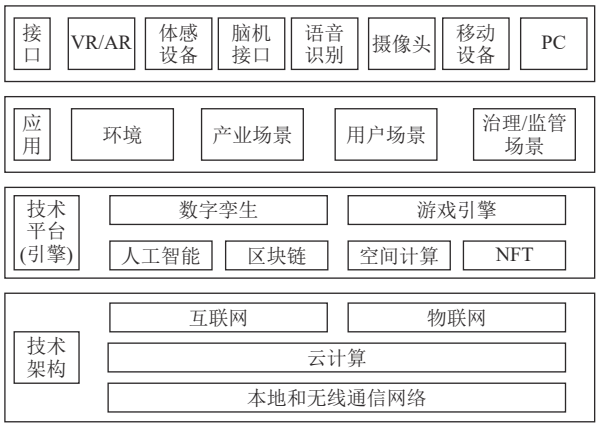


Fig. 7 Deloitte metaverse

图 7 Deloitte 元宇宙

NFT, 应用包括在各个领域中的场景, 访问包括 VR/AR、脑机接口、语音识别、摄像机、手机和 PC. 这种分类方法揭示了元宇宙入口人机交互的重要性, 同时突出数字孪生技术在元宇宙技术层的价值, 强化工业元宇宙的基础设施. 创作者经济是元宇宙生态的重要组成部分, 游戏引擎的引入可以为创作者经济提供支持. 但是, 未体现经济系统对元宇宙的重要性, 也未能给出经济系统的支撑技术, 这将影响元宇宙生态的价值流动.

天风证券[31]发布了《探索元宇宙框架, 生产力的第三次革命》研究报告, 如图 8 所示该研究将元宇宙分为 6 层架构, 分别为硬科技、硬件计算平台、系统、软件、应用和经济系统, 其中硬科技中包括 AI 和数据交互, 硬件计算平台包括 XR、智能手机、PC 和半导体, 系统包括安卓、IOS 和华为鸿蒙, 软件包括底层工具和人工智能, 以及以区块链为核心的经济系统. 经济系统的提出为元宇宙生态提供价值支撑, 尤其以区块链为核心的分布式经济系统, 将极大地提升元宇宙生态的活跃度.

该研究是从产业链视角来审视元宇宙, 层次划分可以根据体系架构的方法进一步优化. 同时, 该设计也没有考虑到元宇宙的治理系统, 其架构无法形成可操作的实践.

中国电子信息产业发展研究院(CCID)[32]的报告《元宇宙产业链生态白皮书》给出了元宇宙的技术体系, 如图 9 所示包括基础设施、核心和应用服务 3 层. 其中基础设施包括网络通信、算力和新一代信息技术, 核心层包括终端入口、时空生成、交互体验、产业平台和虚拟社会架构, 应用服务层包括消费端、行业端

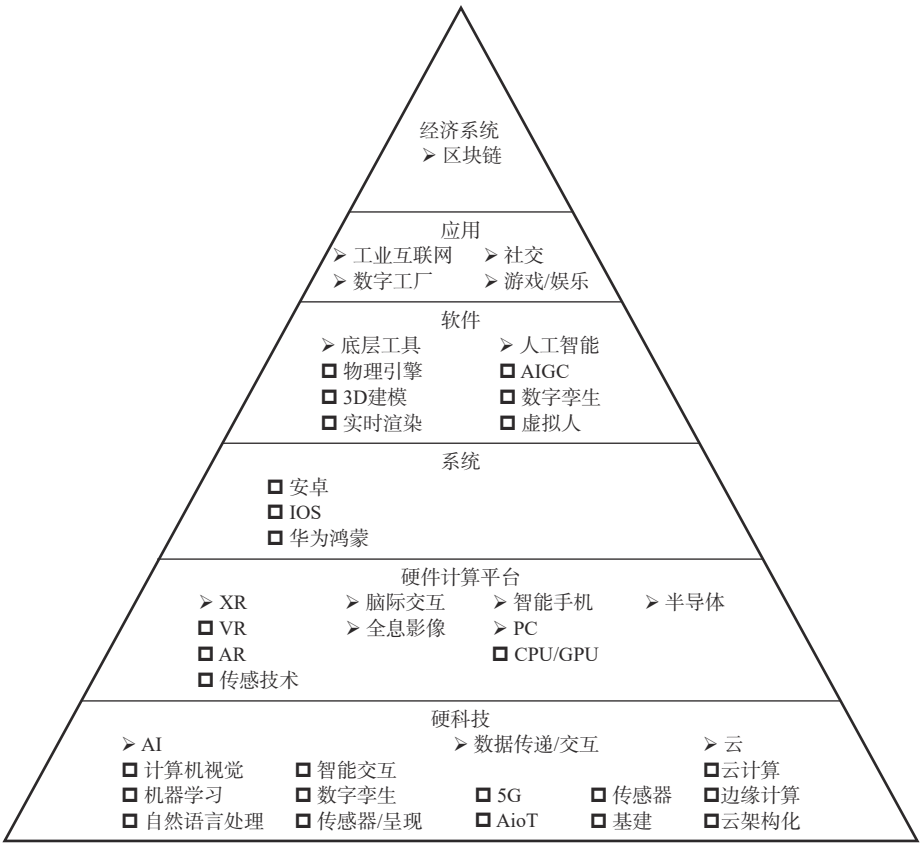


Fig. 8 Tianfeng securities metaverse

图 8 天风证券元宇宙

和政府端. 该研究体现了生态体系结构的特点, 尤其是从服务的视角揭示了元宇宙生态内部的关系. 同时, 虚拟社会架构给出了信用体系、道德伦理和意识形态等重要内容, 为元宇宙的生态治理提供了支持. 然而, 从应用服务层中的内容可以看到, 虚拟人可以支持行业端应用服务和政府端应用服务, 不仅仅是消费端的应用服务. 因此, 服务和应用需要进行分离, 将通用的组件放到服务层, 共同支撑不同场景的应用.



Fig. 9 CCID metaverse

图 9 中国电子信息产业发展研究院元宇宙

元宇宙发展还处于早期阶段, 各方的研究都存在可以优化的空间, 通过迭代的优化来发现最优路径. 从以上分析来看主要存在 4 类问题: 1)研究视角比较单一. 纯技术层面、特定应用层面、安全层面都有相应的研究, 但是缺乏生态体系层面的一体化架构来统领整个产业. 2)层次模糊不清. 大多研究以传统信息系统分层方式为主, 忽略了元宇宙的生态特征和空间交互界面的提炼, 造成层级要素交叉等问题. 3)关键组件分类混乱. 众多技术组件、关键要素、生态特征混杂在一起, 缺乏系统性的分类和归纳总结, 造成逻辑混乱等问题. 4)缺失元宇宙的关键要素. 研究中大多关注技术、应用和内容, 缺少经济系统和治理系统的提炼, 造成架构不完整等问题.

在分析元宇宙生态过程中, 应以技术为基础、以内容为载体、以经济为核心、以协作为目的、以治理为保障, 突出元宇宙生态体系架构的系统化、结构化、体系化. 在系统化方面, 强化生态组件的收敛和抽象过程; 在结构化方面, 强化生态组件之间的层次关系; 在体系化方面, 强化生态组件之间的逻辑和协同关系. 同时, 要重点关注生态中的关键核心组件, 第 5 节将重点分析区块链支撑元宇宙生态的作用, 通过关键核心组件区块链的支撑能力, 可以强化技术、内容、经济、协作和治理各层系统组件的价值, 从而构建可借鉴、可实施、可推广的元宇宙生态体系架构.

3 区块链的技术特点

2009 年中本聪发布比特币网络白皮书以来, 区块链技术发展经历了多个阶段. 在公链方面, 如图 10 所示, 众多公链充分发挥区块链的技术、经济和社会属性, 产业竞赛基本完成, 以太坊以绝对优势胜出, 作为 Web3.0[33] 的基础设施 layer1, Polygon[34], Optimism[35] 等提升以太坊扩展性的 layer2 项目也基本完成布局, 整个产业进入 MakerDAO[36], Bankless[37] 等解决特定场景需求的 layer3 项目的争夺. NFT[38], DeFi[39], GameFi[40], SocialFi[41], DAO[42] 等模式推动了以以太坊为基础的公有链生态的演进, 促进了加密货币和数字资产的实践. 在联盟链方面, 2019 年 10 月 14 日以来, 我国确定了以联盟链为主的发展方向, 产业经历了从共识机制、加密算法、激励机制等关键技术研究、BaaS[43] 平台的建设, 到应用创新培育等阶段. 在这个过程中, 区块链已经在众多领域得到广泛的应用, 在存证确权、数据共享、供应链管理等方面发挥了重要的作用. 但在金融服务方面, 由于数字货币和数字资产带

来的监管和合规等问题还没有解决，仍有很大的发展空间.

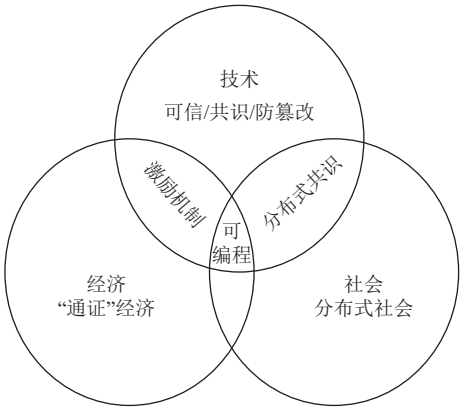


Fig. 10 Technical, economical and social features of blockchain

图 10 区块链的技术、经济和社会属性

如图 11 所示，在 ISO[44]22739《区块链和分布式记账技术术语》国际标准中定义的区块链是：使用密码技术将共识确认的区块按照顺序追加形成的分布式账本.

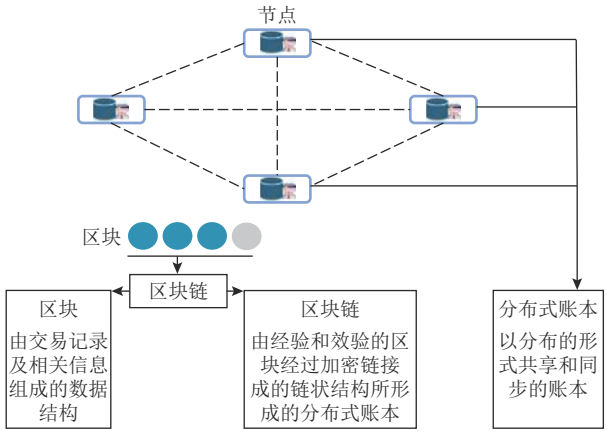


Fig. 11 Blockchain and distributed ledger technology

图 11 区块链和分布式记账技术

区块链技术[45]可以在多方协作的场景下提供可信、共识和防篡改的信任机制，并通过激励机制支撑价值流转，从而促进数字经济生态繁荣发展. 然而，公链和联盟链 2 个技术路线虽然都发展到一定程度，但在应用层面都存在一定的局限性. 在公链方面，大多实践是金融领域的应用，缺乏金融监管、实体产业的关联和标准化[46]的支持，在没有实体产业支持的金融模式下，孤立地发展就像“空中楼阁”，需要更长的时间才能被主流产业接受. 在联盟链方面，区块链平台层出不穷，应用同质化极其严重，主要应用是存证和溯源，对传统产业的赋能也仅仅是效率的提升，成为数字化转型的补充技术，没有充分发挥区块链应用的价值.

从产业发展来看，经济系统是特定产业的核心商业和盈利模式，如果改变了经济系统会颠覆整个产业格局. 以区块链技术的经济系统来赋能传统产业，从商业逻辑上将颠覆传统产业，各产业的既得利益者会为了保护自身的利益而谨慎使用区块链技术. 因此，区块链技术亟需在创新的场景中发挥其价值，基于其技术特点从头构建创新产业的生态格局. 元宇宙的出现为区块链价值的释放提供了支持. 如图 12 所示，通过分析元宇宙生态体系的组织、身份、资产和活动关键要素[47]，我们看到区块链技术对元宇宙的支撑作用. 在本文中，我们将依据元宇宙生态组成来分析区块链[48]技术对元宇宙技术、内容、经济、协作和治理系统的支持.

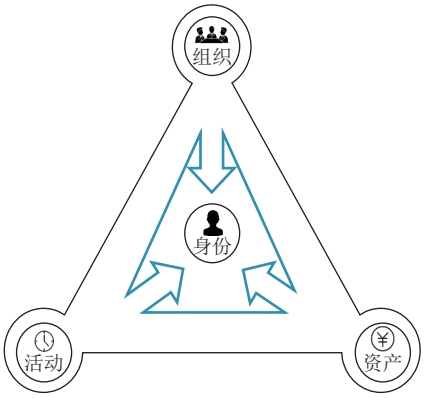


Fig. 12 Key elements of metaverse ecology

图 12 元宇宙生态的关键要素

4 元宇宙生态体系架构

元宇宙作为数字经济的新引擎，不仅构建了一套新的信息系统，更重要的是在技术基础设施之上形成更大的生态[49]，让更多消费者或用户通过沉浸式的体验参与到各种场景的协同，并得到相应的权益、权利和价值. 元宇宙是由一组底层技术、关键内容、经济活动、协同工作、治理规则构成的完整、可持续的生态系统，并进一步实现与现实世界的交互. 元宇宙产业应以技术为基础设施、以内容吸引用户、以价值沉淀用户、以协作打通用户连接、以治理构建健康的数字环境，从而为用户提供更有价值的服务[50].

如图 13 所示，我们将元宇宙生态体系架构分为技术系统、内容系统、经济系统、协作系统、治理系统 5 个层次. 技术系统为元宇宙提供技术基础设施，充分体现技术集成融合、开源开放、互联互通、可连

接等特点, 支撑内容、经济、协作和治理系统的运行; 内容系统为创作者提供数字内容创作工具和环境, 为用户提供更好的体验, 并为经济系统提供数字资产; 经济系统为元宇宙生态提供资产创建和流转的能力, 并促进更积极的协作; 协作系统增强元宇宙生态相关方的交互能力, 并支持治理系统的合规监管等活动; 治理系统是元宇宙生态的防护系统, 将监管或合规要求固化到代码中, 以提升治理和监管的效率, 保障元宇宙生态的健康发展.

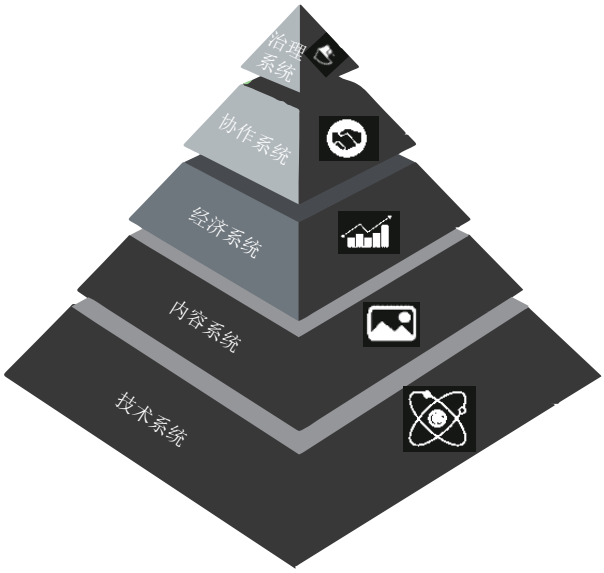


Fig. 13 Architecture of metaverse ecological system

图 13 元宇宙生态体系架构

图 14 给出了元宇宙生态体系架构的 5 层系统需要具备的特征.

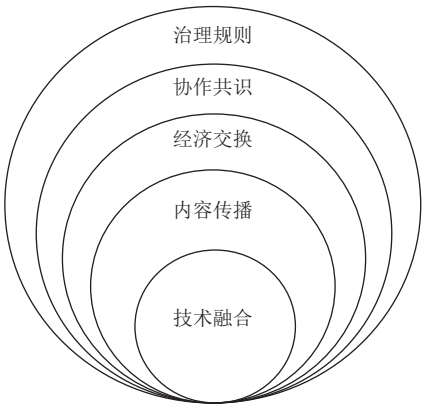


Fig. 14 Features of metaverse ecological system

图 14 元宇宙生态体系架构特征

技术系统体现为“融合”特性, 即体现技术集成、兼容、开源开放、互联互通、可连接等内容. 元宇宙需要区块链等新一代信息技术的集成创新, 集成不是技术的堆砌, 要通过开源开放的形式, 促进多种技术的充分融合和兼容, 支持不同层级的互联互通, 让用户可以随时连接获得服务. 技术系统主要涉及云计算、大数据、物联网等新一代信息技术.

内容系统体现“创作者经济”的特性, 内容自身需要具有开放性、创造性、多样性、实时性等诸多性质. 元宇宙必将不是封闭生态, 通过开放生态, 让更多富有创造力的参与者创作出更多样性的内容, 从而形成实时动态更新的元宇宙生态. 内容系统主要涉及 AIGC 相关的内容生成技术, 以及内容呈现和渲染等图形图像技术.

经济系统主要体现“交换”特性, 要求元宇宙身份的唯一性, 具备激励机制和权益权属保障等. 经济系统的核心组件是资产, 资产需要与具有唯一物理身份映射的参与者相关联, 才能固化资产的权利和保障参与者的权益. 同时, 激励机制将吸引更多参与者持续参与元宇宙生态, 是推动元宇宙生态持续运行的重要组件. 经济系统主要涉及区块链为支撑的数字资产生成、流通和托管相关技术.

协作系统体现“共识”特性, 要求元宇宙具有实时多方协作、分布式、自组织、自适应等. 无论是社交元宇宙、教育元宇宙、工业元宇宙等, 都与线下的组织协作模式有所区别, 参与者可以自发开展特定目的的活动, 在分布式技术的支持下实现实时多方协作, 任何一方参与或退出都不影响元宇宙生态的运行. 协作系统主要涉及数字身份认证、分布式协作等技术.

治理系统体现“规则”特性, 即需要对版权保护、数字认证、数字内容、金融科技等方面进行监管. 元宇宙不是“法外之地”, 治理系统是元宇宙生态的“刹车系统”. 在内容方面的版权保护和合规审查、在身份和物品上的数字认证、在金融相关的货币和资产上的安全保障, 都是治理系统重点关注的内容, 完善的治理系统是元宇宙生态健康发展的保障. 治理系统主要涉及隐私保护、信息安全等技术.

4.1 技术系统

本体论中的形式化需要基于计算机科学建立逻辑框架, 以呈现和运行元宇宙中的逻辑对象及相互关系[51]. 如图 15 所示, 依据计算机领域常用的形式化分层方法, 元宇宙可分为元网络、元系统、元服务、元场景和元空间 5 层, 这 5 层架构在运行逻辑上层层递进紧密联系, 共同构成元宇宙的技术系统的核心组件. 同时, 元宇宙系统也要同外部设备进行数据交换, 与其他元宇宙系统进行跨平台身份认证、内容交互和资产流通, 通过多元宇宙的形态构成元宇宙生态体系.

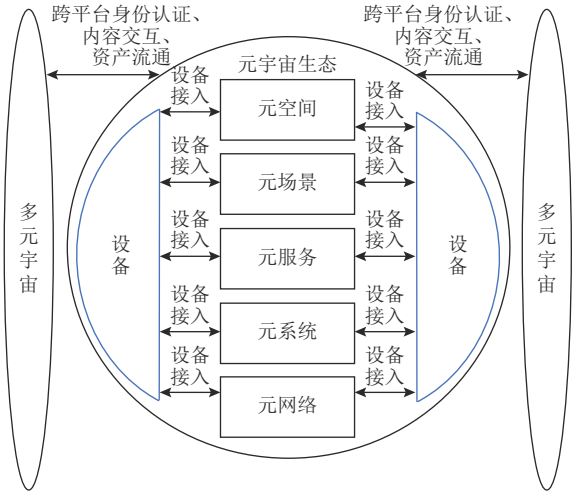


Fig. 15 Technical system of metaverse

图 15 元宇宙技术系统

图 16 给出了元宇宙技术系统的元网络、元系统、元服务、元场景、元空间 5 层架构的具体组件，各个组件相互支持形成完整的技术体系.

1)元网络

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，为元宇宙提供底层基础设施. 其中 5G 等通信技术对大量数据进行快速传输，实现了海量数据的低延迟传输；分布式数据存储技术确保了海量数据的隐私性与安全性[52]；网络技术为元宇宙的设备接入和消息通信提供支持.

元网络通过先进的通信网络技术以高流量密度和链接密度快速实现万物互联，使物理世界与虚拟世界达到完美交互. 在元宇宙中，低延时、沉浸渲染直接影响到用户体验. 据 Subspace 统计，游戏延迟时间每增加/减少 10 ms，用户的游戏时间就会减少/增加 6%，游戏延时过长会严重影响到客户增长数量. 在元网络中先进通信技术和计算技术的应用可使游戏延迟小于 10 ms 这一临界值，能够确保用户获得较高的游戏体验质量.

2)元系统

元系统是实现元宇宙各项功能的技术基础. 它以区块链为核心，集成大数据、云计算、人工智能、物联网、人机交互和信息安全等技术，为元服务提供系统级基础技术能力，是实现元宇宙中功能多样性的关键环节.

元系统中的新一代信息技术不是简单意义上的堆叠，需要形成面向数据的新一代信息技术的融合架构，以更好地释放数据的价值. 新一代信息技术的网络、存储和计算等通用组件可以下沉到元网络中，各项技术的特性组件可以封装成为独立的服务，相互支持和协作，以支撑元服务层的各项活动.

3)元服务

元服务是实现元宇宙各项功能的应用开发技术集合. 元服务包括身份认证、隐私计算、环境渲染、奖励机制、内容运营、支付交易、资产管理、3D 引擎和模拟仿真等技术，为元场景搭建、应用功能现实提供技术支撑.

元宇宙本身是一个庞大的数据集，其构成包含身份特征、社交关系、财产状况、工业生产、自然景观等多种信息要素，元宇宙的运行会涉及到身份特征识别、财产隐私、信息安全、环境渲染等多种问题，元服务为这些问题提供了解决方案. 例如在元宇宙

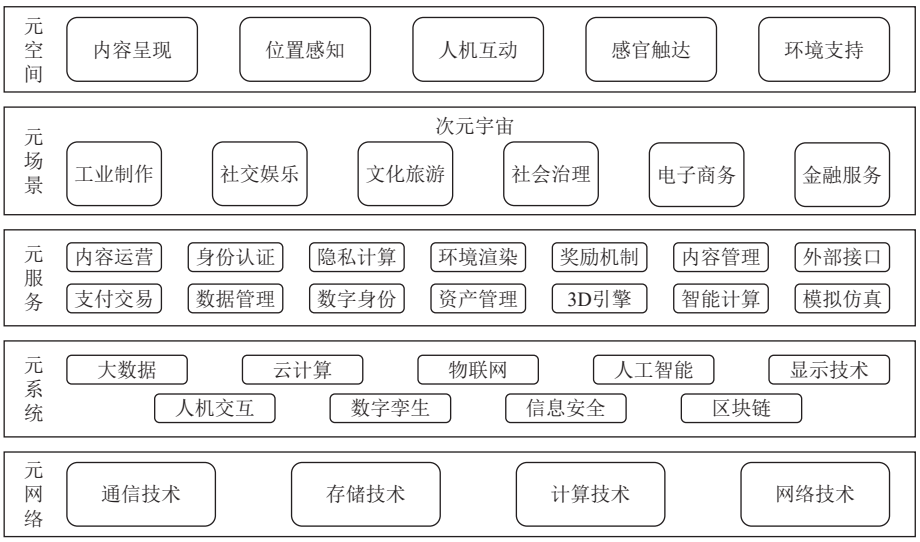


Fig. 16 Five layers of architecture in metaverse technical system

图 16 元宇宙技术系统的 5 层架构

中最为常见的个人财产、生活隐私信息面临着被泄露盗窃或者滥用的风险,隐私计算技术能够实现在数据不可见状态下完成计算和分析[53],确保元宇宙数据安全使用.

4)元场景

元场景是实现社会生产生活在数字虚拟世界的映射,元场景构筑了元宇宙丰富的生态多样性.元场景主要包括制造、娱乐、社交、金融、能源等方面在元宇宙中的应用.每个元场景可以形成次元宇宙[54],多个元场景可以组成元宇宙、多个元宇宙可以组成多元宇宙.

在元场景中,通过数字创作把物理世界的各种场景映射到数字虚拟世界中.与我们生产生活密切相关的场景如工业产品生产制造、文化旅游、社交娱乐等都可以在元宇宙中形成元场景.利用区块链技术,可以实现各个元场景间的可信数据互联互通、价值转移等功能.同时,由于不同的时空特征,每个元宇宙都有其各自与众不同的特点,不同元宇宙之间实现互联互通和价值交换,形成一个较为完整的数字虚拟世界.

5)元空间

元空间包括元宇宙生态运行过程中需要外部支持的空间计算设备,以支持元宇宙中高度仿真的数字场景可以与真实场景进行信息交互,具备现实世界中人和物的大部分特征.元空间层通过内容呈现、位置感知和人机互动、感官触达等技术来实现各种仿真功能.

在元空间中,虚拟人[55]要与周围环境进行互动,发生行走、躲藏、交谈等动作,这些活动需要通过空间感知设备获取物理活动信息,利用位置定位、姿态感知、人机互动、感官触达等技术来处理多种数据信息需求,使元空间拥有可媲美真实空间特征的虚拟场景.

4.2 内容系统

元宇宙内容系统可以支持元宇宙生态的创作者经济,促进数字内容的价值转换.元宇宙内容系统可分为内容场景创作层、内容特性层,以及内容价值转换层.元宇宙内容系统具有开放、可编程、可迁移等特性,并支撑工业、能源、社交、娱乐等场景的应用,如图 17 所示.

1)内容场景创作层

元宇宙内容场景创作可以帮助传统产业实现降本增效,包括工业场景、医疗场景、金融场景等,都已实现在元宇宙中的内容展示.此外,文化娱乐等内容创作行业也积极布局元宇宙,VR/AR 游戏及电影产业近些年创收数目惊人,这与内容创造行业的优势密不可分.已有 IP 内容创作有大量用户基础,结合元宇宙技术应用,将传统 2D 与 3D 内容场景进行优化创新,进而实现极强的娱乐性与沉浸感,以全新的感官形式传递内容场景价值.

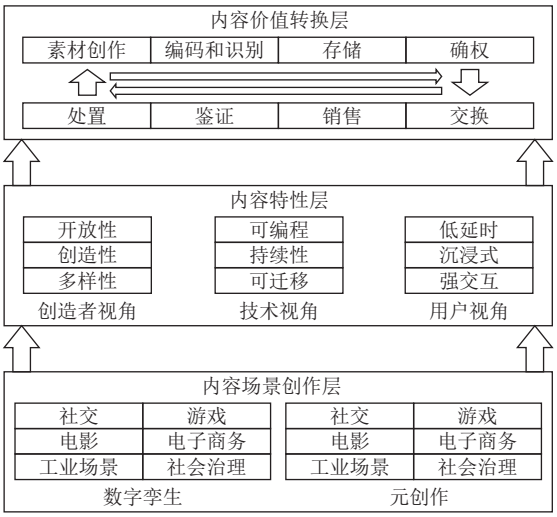


Fig. 17 Content system of metaverse

图 17 元宇宙内容系统

物理实体驱动及元创作是数字内容创作的主要方法,物理实体驱动应用物理模型、传感器等手段将物理实体活动映射到虚拟空间中,从而实现虚拟空间中的内容展现.元创作即元宇宙中的原创内容,是指完全独立于物理世界中的实体与非实体形象.这些原创内容往往原生于数字创作平台,可以实现自我迭代、多维立体地吸引创作者参与创作和用户参与体验.

2)内容特性层

元宇宙的数字内容创作者需要创造者在高度开放性①、多样性②、创造性③的环境中进行,保证创作者及用户群体数量和创作内容的多样性,保障内容创作可编程④、持续性⑤、可迁移⑥.通过低难度技术内容创作、低难度的创作门槛,高活跃度的创作者群体可孵化大量内容场景,增强内容可持续发展,创建创作者经济生态.不同场景间进行联合创作,并形成大

① 开放性:更多用户可以低成本地进行内容创建和使用.

② 多样性:内容展现应对不同用户群体具有吸引力.

③ 创造性:可以在数字原生创新内容的表现形式和商业模式.

④ 可编程:用户可进行 2 次开发或自定义配置.

⑤ 持续性:需要通过激励等机制推动持续性数字内容创作和消费.

⑥ 可迁移:用户在数字内容中的数据和资产等可以迁移到其他平台.

型社区或用户内容产业链，进一步强化用户间互动.

数字内容应具备实时性①、低延时、沉浸式②等特性，满足用户多元应用体验. 现有的强沉浸感数字内容主要借助硬件设备功能发挥作用，结合大算力和存储设备，为用户提供内容沉浸体验. 同时，也需要建立防沉迷机制，警惕由过度沉浸导致的用户行为与认知迷茫.

3）内容价值转换层

内容创作者为元宇宙提供大量虚拟内容场景，保障了元宇宙运行及场景多样性，为进一步建立元宇宙内部经济机制与激励机制[56]，促进元宇宙可持续发展，发掘内容创作经济价值是十分必要的，即元宇宙数字内容资产化.

首先，创作者通过制作原创素材，并在作品上应用编码、标识后，依托区块链技术保证数字资产的唯一性、真实性和永久性，增强其流动性，并有效解决上链资产的确权问题，解决版权保护. 其次，通过交换、销售、发行出版等方式进行交易，并在交易后衍生出鉴证、处置等一系列附加服务，实现内容创作价值转化为经济价值.

4.3 经济系统

元宇宙作为全新数字经济生态，能够在现实世界中创建新型价值产品和服务，打造数字和物理世界融合的新型经济生态体系. 在元宇宙中，所有商品都是以虚拟形式呈现，可以创造数字资产和商品并进行交易. 元宇宙经济系统包括数字资产的创建、确权、交易和流通，从而进入不同元宇宙场景中支持生态体系的价值循环，作为信息消费的价值载体创新数字经济商业模式，建立可持续的价值体系.

1）数字价值创建

价值作为经济体系的基础，是支撑和维系市场的基本要素，而创建商品是市场交易的前提. 创造数字价值的生产方式主要分为 2 种：PGC 即专业生产内容；UGC 即用户生产内容. PGC 为用户提供了从视觉、内容和创意上都给出的一个“精致”的效果. UGC 在元宇宙世界里会更加普遍，用户可以在元宇宙中提供创建独特的、个性化的数字内容. 需要强调的是针对 UGC 内容，需要进行相应的产权评估和创建有效的数字资产凭证，才能有效支持整个行业的可持续发展.

2）数字资产确权

数字内容可以作为数字资产[57]，并通过数字资产的产权属性、身份认证和数据权利，为数字交易提供基础支撑. 当前，金融属性相关的 FT（同质化通证）、DeFi（分布式金融）、NFT（非同质化通证）和 xFi（泛指在各个领域的金融形式）通过大量的实践，探索数字化金融服务模式. 其中，DeFi 正在分布式网络下尝试创新传统金融服务模式；NFT 进一步在数字生态中呈现了资产的表现形式，扩大了数字生态的资产规模. NFT 加速了数字环境下的资产流通，无论是数字资产还是实物资产凭证，例如艺术品、房地产、其他证券和现实资产. 另外，NFT 还对数字艺术和数字版权带来了新的经济潜力，通过独特性和唯一性，保证了资产来源和真实性.

3）资产交易场景

在创作者经济中，构建相应的市场交易体系能够满足各个不同用户的交易诉求，能够有效激活元宇宙的数字资产价值，从而促进更多数字价值诞生，实现数字资产价值最大化和元宇宙价值最大化，以及实现有效的交易场景需要核心技术的支持. 可以肯定的是元宇宙会经历不同阶段的业务场景发展，目前仍然处于以游戏、社交[58]为主的交易场景，我们预测 2025 年左右会有部分场景落地，到 2030 年会有大批量场景成为现实，数字资产交易将成为促进元宇宙应用创新的市场引擎.

4）资产交易流通

为了方便用户在元宇宙中实现实时有效的资产兑换、交易和流通，基于区块链构建的数字资产凭证，可以为元宇宙数字资产交易提供去中心化、可信的系统平台，从而增强元宇宙中数字资产流通，激活元宇宙中数字资产的价值. 通过创建数字资产并进行价值确权，建立有效的数字资产交易市场，再进行价值转换和流通是元宇宙中经济系统的核心过程，有利于推动形成可持续发展的元宇宙经济体系.

4.4 协作系统

协作系统是元宇宙生态运作的重要组织机制. 协作系统在分布式系统、智能合约等底层要素的支撑下构建出具有分布式③、自组织④、多方协作⑤等特

① 实时性：用户可以随时登录数字内容完成相应的活动.

② 沉浸式：数字内容需要提供 XR 等沉浸式体验模式.

③ 分布式：可以在可监管环境下进行点对点通信.

④ 自组织：可以在可监管环境下通过预设机制和功能进行自发组织.

⑤ 多方协作：需要支持任意多方进行协作，并支持参与者动态变化的活动.

征[59]的元宇宙生态. 这种分布式自治特性具有规模协作、资源整合等价值, 也面临规则制度合理性、系统安全[60]等挑战.

如图 18 所示, 元宇宙在基于分布式自组织的协作系统[61]下, 能够发挥创作者经济价值, 促进群体收益[62], 打造分布式商业[63], 形成数字社会新生态[64].

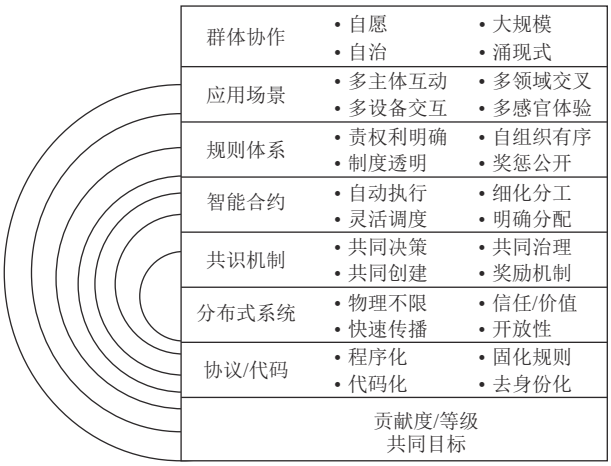


Fig. 18 Collaborative system of metaverse

图 18 元宇宙协作系统

协作系统底层要素方面, 具有协议/代码、分布式系统、共识机制、智能合约、规则体系、应用场景、群体协作 7 大底层要素. 协议/代码、分布式系统、共识机制通过程序化设计、分布式硬件基础、共识激励机制构建元宇宙协作系统的底层核心基础; 通过智能合约、规则体系构建出分工明确、自组织有序、奖惩公开的中层共识逻辑; 通过应用场景、群体协作要素构建多设备交互、多领域交叉、多主体互动的上层应用模式. 7 大要素以自底向上的方式构建起元宇宙分布式自组织的协作系统逻辑.

1)分布式多方共建

协作系统能够为元宇宙带来新的社会联系、提升多方协作的可移动性和协作水平, 消除远程协作和混合制工作可能导致的工作隔离和劳动力脱节. 助力多样结构组织以自适应、自组织方式开展共建工作, 建立合理规则以及高效率决策能力, 开展跨群体、跨应用场景分工协作, 增强工作参与方凝聚力与工作效率.

2)多场景资源整合流转

资源高效流转可产生巨大价值, 能够有效降低协作成本. 通过整合各类资本数字化, 依托程序化协作机制在多场景下开展交易、流转等活动, 能够有效减少管理和实践差异带来的摩擦风险, 大大提升元宇宙交易与管理效率.

元宇宙在基于分布式自组织的协作系统下能够充分发挥个体经济价值, 打造分布式商业生态. 价值方面主要包括规模协作、资源整合、降低成本、高效管理和真实体验. 规模协作指元宇宙中通过底层要素搭建成的分布式生态, 个体之间更加平等、互利, 在高效的组织下形成更大规模的集体协作; 资源整合是指各类资产、数据、人力等通过数字化方式形成可流转、可交易、可溯源的数字资产, 产生出巨大的价值潜力; 降低成本是指在程序化的协作机制下产业链上下游不同群体形成高效、低成本的信任价值, 减少交易摩擦, 大大降低协作成本; 高效管理是线上线下一体化, 管理更加扁平化, 流程更加简化, 资源调度更加灵活; 真实体验是随着元宇宙 VR, AR 等技术的不断成熟, 元宇宙中的体验更加真实, 具有沉浸感.

协作系统的挑战如图 19 所示, 协作系统存在参与度低、信息爆炸、规则合理性、系统安全、决策效率低等挑战. 现有元宇宙下的体验效果、隐私安全、必要性等问题使得相当一部分人不愿意参与元宇宙, 存在参与度低的挑战; 元宇宙中各类信息及信息交流更加便利, 随之带来信息数据繁多, 有效性信息更少; 规则合理性受到挑战, 在权益证明的共识机制下, 资本优势和进入时间先后次序带来公平合理的质疑, “贫富差距”现象或将更加明显; 智能合约是否存在漏洞, 系统安全和用户资产安全、隐私安全受到极大的挑战; 决策效率在分布式群体下的管理更加分散从而或许存在个体效率低下导致群体决策效率低的问题.

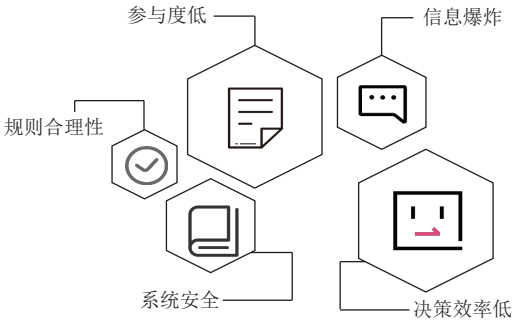


Fig. 19 Value of collaborative system

图 19 协作系统价值

总之, 元宇宙协作系统在极大促进个体释放价值的同时也面临着诸多挑战, 但在数字化趋势的背景下, 元宇宙将会催生出更加高效的生产方式和商业模式, 推动新业态、新模式、新经济的创新和发展, 成为数字经济的新引擎.

4.5 治理系统

元宇宙生态体系无一不涉及版权保护、数字认证、内容合规、金融合规等需要监管与治理的重点领域[65]. 同时，元宇宙被认为是平行于现实世界的、由科技基奠形成的虚拟世界，其基本运行规则与当中的伦理问题不容忽视. 可以说，元宇宙中治理系统的建立健全是确保元宇宙正常运转的前提. 元宇宙治理系统如图 20 所示.

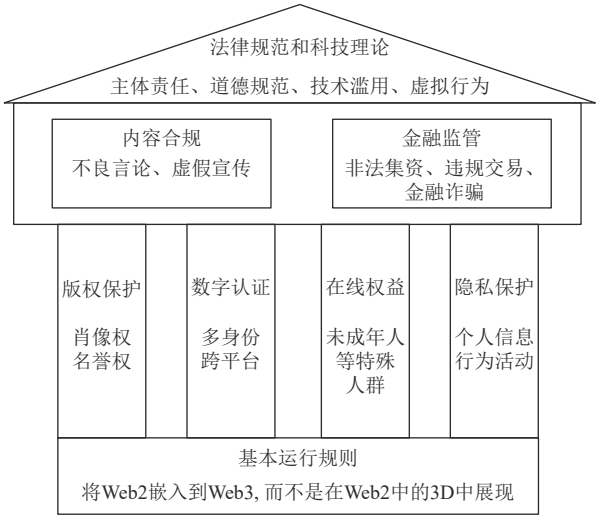


Fig. 20 Governing system of metaverse

图 20 元宇宙治理系统

1)版权保护

元宇宙包含大量以数字形式存在的原创性内容，例如元宇宙中的虚拟数字人、物品、场景等元素可能是来自或改编于现实世界的对应实体，包括人物肖像权、音乐、图片、著作版权等，甚至还涉及到多人协作产生的作品等，对于这些跨越虚实边界的内容需要确认版权并实行保护.

2)数字认证

元宇宙存在的任何事物与其他事物发生联系互动、变化，构建完整的技术系统、社会系统、经济系统等，都需要各事物具有唯一的身份或标签，例如个人、个人资产(艺术品或收藏品等)所有权等，使得身份认证、资产的价值归属确权、价值交易流通等成为可能. 数字认证可为元宇宙的去中心化身份体系和经济体系等提供底层支撑.

3)在线权益

随着支撑元宇宙的网络技术等新兴技术的应用和普及，在线交易、社交等在线活动和行为呈现出了蓬勃发展的态势，丰富新奇的在线内容、方便快捷的服务、多样化的选择，以及元宇宙中交易环境的虚拟性、社交、互动行为的在线性以及开放性等特征，给在线消费者等主体带来了巨大的便利.

4)隐私保护

随着网络空间的普及和扩大，人们在虚拟空间中隐私权受到侵犯的情形越来越多、越来越复杂. 元宇宙中虚拟空间的广泛互联，大量主体实时在线，各类隐私信息的巨量采取、高速传递和传播等，导致元宇宙中的隐私保护问题更加重要.

5)内容合规

元宇宙中存在和不断实时产生、变化、传输、分发等的各类内容，不论是由外部的物理实体世界映射进入元宇宙，或是内部的主体或各类智能算法等直接产生的内容(例如元宇宙中由现实主体控制在元宇宙内部发布，或虚拟主体发布的内容是否合法合规等)，需要对元宇宙运营主体等各类主体产生或传播等内容进行统一监管.

6)金融监管

当前的元宇宙还没有任何的金融活动，但是未来可能会出现元宇宙虚拟空间内部各主体之间发生的金融活动，元宇宙虚拟空间与物理实体空间之间发生的双向金融活动，例如交易、购买、拍卖等，应当未雨绸缪，重点考虑建立和完善监管内容，保证相关金融活动的合法合规和安全高效.

7)科技伦理

元宇宙是数据和信息支撑的智能增强数字虚拟世界，元宇宙的运行需要依赖各类科技、工具设备等实时产生和处理海量各类数据. 不断快速增加和更新的个体(创作者、用户等)隐私数据将是支撑元宇宙持续运转的重要底层资源和生产要素，对于科技伦理的监管即各类科技对元宇宙中各类信息数据是否符合伦理的使用，需要进行全方面、全流程监管与发展平衡的监管.

8)运行基本规则

当前，元宇宙的发展仍然处于萌芽阶段，具有新兴产业技术的不成熟、不稳定的典型特征. 元宇宙的运行是建立在数据上的虚拟宇宙，需要各种信息技术的支撑，同时需要大量主体之间的社会活动，元宇宙的基本运行规则至少应该包括数据、技术、社会 3 个方面.

一是数据方面的基本规则. 不仅要保证元宇宙所有数据信息的安全，而且要求元宇宙所有数据信息的产生、存储、利用、传输、交易、销毁等应当合法合规，不仅是符合现有的法律法规，而且要符合随着元宇宙产业和技术等发展逐步制定的未来的各项

法律法规. 二是技术方面的基本规则. 由于元宇宙是依托人工智能、虚拟现实等前沿技术相关的软硬件技术形成的虚拟世界、技术世界，需要遵守支撑整个元宇宙世界存在的技术规则. 三是社会方面的基本规则. 元宇宙在未来能否健康发展，应重点研究元宇宙的知识产权保护和虚拟财产保护等方面的规则问题，从而在未来能够应对“元宇宙”内虚实身份转换的合规管理与风险防控.

5 以区块链为基础设施的元宇宙生态体系

在元宇宙的技术、内容、经济、协作和治理 5 层生态体系中，区块链技术以其独特的技术特点，将成为元宇宙的重要基础设施.

5.1 区块链支撑技术系统

在元宇宙技术系统中，单项技术的出现都不是偶然的，是随着海量数据的出现而形成的加工数据、释放数据价值的工具. 如图 21 所示，物联网做数据采集、大数据做处理、人工智能做数据利用、云计算做数据承载和资源调度、5G 做数据传输，区块链利用独特的技术特点为新一代信息技术的集成创新提供支持. 区块链可以为物联网提供身份认证和端到端的数据安全，为大数据处理过程提供“可用不可见的”可信数据共享[66]的环境，从而推动人工智能获得更多维度、深度的高质量数据，加速各类算法的优化和提升. 在人机交互技术中，区块链可以建立分布式交互体验和分布式身份认证体系[67]，保障用户的权益和数据隐私[68]. 在数字孪生技术中，区块链可以保障多方协作数字孪生的数据权益.

利用区块链技术的特点，保障了元宇宙中的数据和资产的权益，使各项新一代信息技术得以充分融合，促进其他技术在合规的前提下利用数据形成新的面向数据的技术体系，甚至形成新的面向数据的操作系统，来支持元宇宙在工业、商业、社交等元宇宙的运行. 因此，区块链技术是元宇宙技术系统中的核心技术.

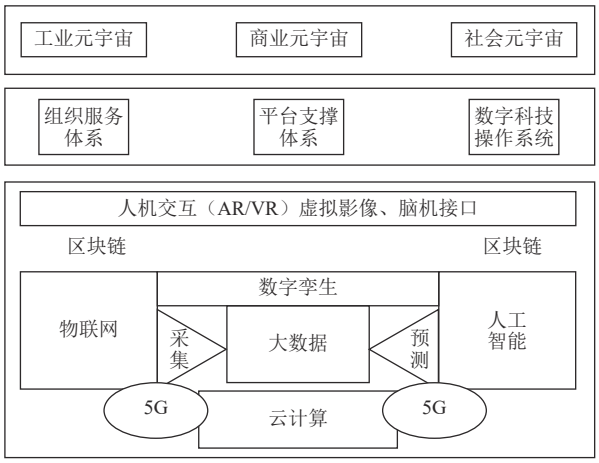


Fig. 21 Integration of new generation information technology

图 21 新一代信息技术集成

5.2 区块链支撑内容系统

元宇宙内容系统包含从数字内容创建到内容处置的全生命周期过程，数字内容需要具备开放性、可编程、多方协作、可交互等特点，这就需要构建创作者经济的生态，从而促进更丰富的内容创新，增强用户的体验.

在此过程中，数字内容群体协作、编码和标识、版权确权、转移、交易和鉴证等都需要区块链技术的支撑. 在创作过程中，区块链利用其分布式账本特性，支持群体协作创作过程. 在编码和标识过程中，可以通过分布式身份认证体系完成数字内容的编码和标识. 基于区块链的分布式存储可以最大效率地利用闲置存储资源，降低云宇宙的海量数据计算的能耗. 区块链的链上信息不可篡改的技术特点，可以帮助完成数字内容确权，并通过共识机制[69]、跨链[70]和智能合约帮助完成数字内容的转移和交易过程，并保证创作人的权利和权益.

创作者经济的核心要素是数字内容和资产确权，通过区块链技术可以将创作者生态高效整合，形成创作者、发行者、消费者多方共赢的商业模式，如图 22 所示以区块链技术有效保障生成内容登记确权，通过编码、标识等方式，助力多产业主体解决版权保护等一系列问题，促进更丰富的数字内容持续创新，从而支撑元宇宙生态持续迭代发展.

5.3 区块链支撑经济系统

经济系统是元宇宙中的重要支柱，缺乏经济系统的支持，元宇宙将仅仅是“3D 游戏”和“3D 动画”[71]. 经济系统强调数字货币[72]和数字资产的交换和流通，区块链是迄今为止唯一可以最好支持数字资产的技术.

在数字资产创建、确权、交易和流通过程中，区块链具有其天然的技术优势. 在数字资产创建过程中，同质化代币、非同质化代币是基于区块链的原生数字资产，可以成为元宇宙中的价值载体. 在数字资产确权过程中，基于区块链的分布式身份认证、分布式存储、多重签名等技术可以支撑确权的过程. 在资产交易和流通的过程中，分布式点对点交易、资产跨链转移等方法已经基本成熟.

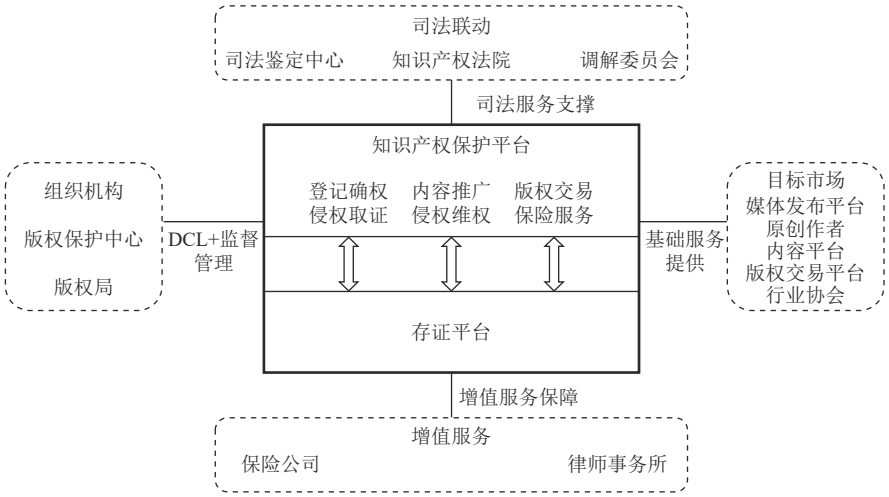


Fig. 22 Example of content system supported by blockchain

图 22 区块链支撑内容系统示例

经济系统的核心是数字资产凭证，如图 23 所示，基于区块链技术可以高效打通数字资产生命周期的全过程. 区块链技术具备交易支付能力，能够实现点对点的价值传递，可以为元宇宙实现交易支付、实时清算、分配激励等能力，支撑元宇宙广泛而频繁的价值交易活动. 让用户在元宇宙中获得收益，形成可持续的经济系统，促进更活跃的元宇宙生态.

5.4 区块链支撑协作系统

元宇宙生态将提供巨大的信息消费场景，不同类型元宇宙需要组织不同类型的消费者参与，在大规模、高并发的元宇宙场景下，动态的组织形式和持续变化的协作规则对基础设施提出很高的要求，很难用中心化系统来支持.

区块链技术可以很好地支持分布式自组织的特性，结合可切换的共识机制[73]为元宇宙提供更灵活的组织形式，形成集体决策、共同治理的生态. 基于区块链的智能合约，可以让元宇宙生态组织可以动态地调整协作规则，灵活调度协作资源. 同时，可以利用激励机制为协作参与方提供更好的激励，让更多用户参与到元宇宙生态，在规则体系下推动元宇宙的持续运行.

协作系统的核心要素是共识，如图 24 所示基于区块链技术打造的分布式协作体系，通过智能合约、共识机制构建出分工明确、自组织有序、行为公开的共识逻辑；通过应用场景、群体协作要素构建多设备交互、多领域交叉、多主体互动的应用模式. 可以促进形成元宇宙自组织的生态，在促进用户参与积极性的同时，扩大元宇宙生态的影响力和规模.

5.5 区块链支撑治理系统

从其他产业发展的过程来看，初期必定出现诸

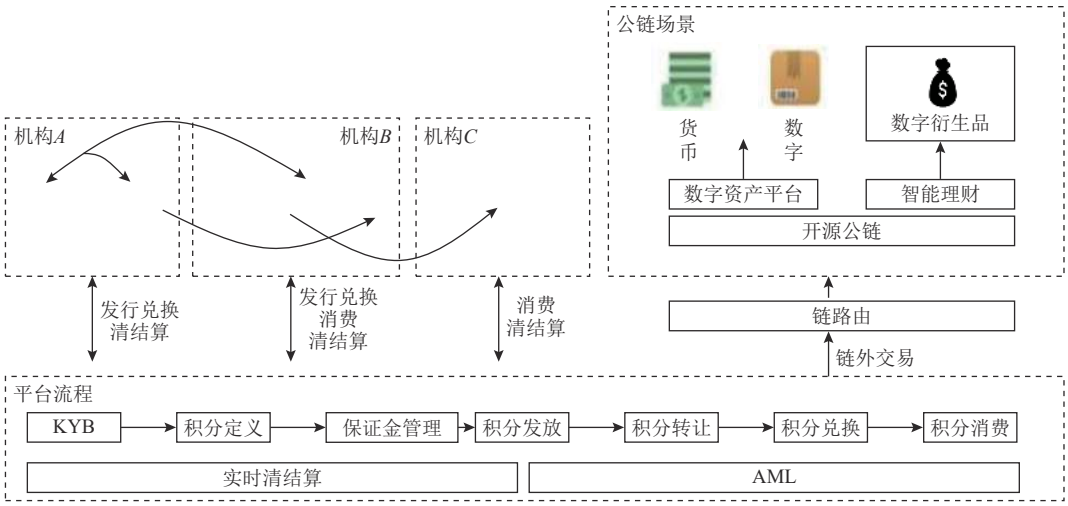


Fig. 23 Example of economical system supported by blockchain

图 23 区块链支撑经济系统示例

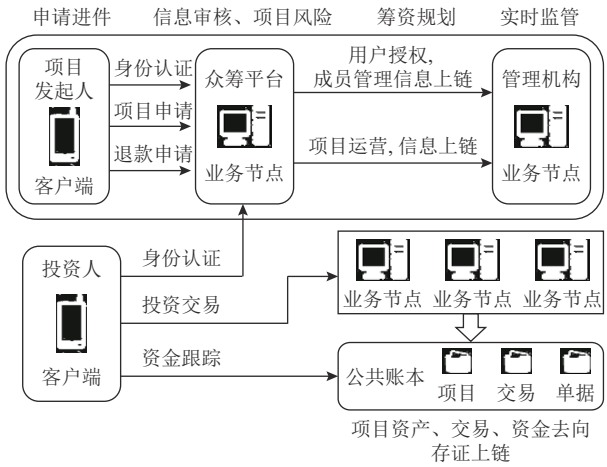


Fig. 24 Example of collaborative system supported by blockchain

图 24 区块链支撑协作系统示例

多问题, 随着产业逐步成熟和监管规则的逐步出现, 慢慢进入到健康发展过程. 元宇宙亦是如此, 需要符合国家和地区的金融、内容、数据等监管合规要求. 监管合规要求需要通过技术手段嵌入到系统里, 从而降低监管成本.

元宇宙的监管主要包括内容、数据和金融等方面, 区块链技术在内容和数据 2 个方面都可以成为监管和治理的有效手段. 在内容方面, 用户的肖像权、名誉权、数字内容版权、数字资产所有权都可以通过区块链进行确权和存证, 保障用户权益. 在数据方面, 区块链结合隐私计算技术可以形成完善的数据隐私[74]、数据权利和权益的保护, 支持多元宇宙间的数据资产流转.

治理系统的核心是规则, 如图 25 所示区块链结合智能合约可以将监管和合规要求固化到代码中, 自动获取违规行为和活动, 为监管和合规提供工具级支持, 促进形成可持续发展的元宇宙生态.

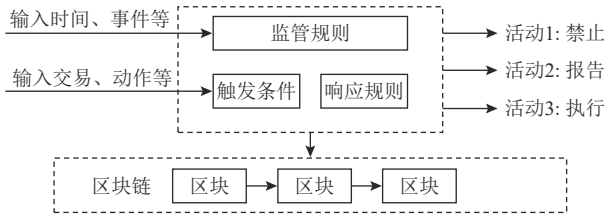


Fig. 25 Example of governing system supported by blockchain

图 25 区块链支撑治理系统示例

6 结 论

本文提出了一种系统性研究元宇宙生态的方法, 将元宇宙生态从技术、内容、经济、协作和治理 5 个系统, 提出每个系统的重点内容和实践方法. 同时, 结合区块链的技术特点, 探究区块链支撑元宇宙生态体系架构的能力. 元宇宙生态结构化研究将为建立元宇宙产业共识提供依据, 为开展元宇宙工程实践提供思路, 为元宇宙创新应用提供基础.

未来的工作包括 3 个方面: 1)在本文研究的基础上开展实验验证, 基于区块链技术平台构建元宇宙生态体系架构原型, 验证区块链技术支撑元宇宙生态的有效性; 2)基于研究成果在工业或文化等特定领域开展应用研究, 结合各行业的特定需求完善元宇宙生态体系架构组件, 以灵活地支撑多领域应用; 3)开展元宇宙标准化研究, 研制元宇宙标准体系, 开展重点标准研制, 固化实验验证的有效性结果.

作者贡献声明: 李鸣提出了本文的整体思路和研究方案, 并撰写论文; 宋文鹏提出结构化建议; 宗燕提出建议并修改论文; 刘冕宸提出建议并修改论文.

参 考 文 献

[1] IEC. Exploringmetaverse[EB/OL]. (2022-12-21)[2023-09-20].https://www.iec.ch/blog/exploring- metaverse

[2] IEEE. IEEE Computer Society SAB SC metaverse PAR study group introdction[EB/OL]. (2022-08-25)[2023-09-20].https://sagroups.ieee.org/metaverse-parsg/

[3] Metaverse Standards Forum. Setting course for an open metaverse part 1: Updates from the first 60 days of the metaverse standards forum [EB/OL]. (2022-09-01)[2023-09-20].https://metaverse-standards.org/blog/

[4] OpenmetaversealllianceforWeb3. Why we created oma3[EB/OL]. (2023-01-13)[2023-09-20].https://www.oma3.org/post/why-we-created-oma3

[5] NVIDIA. NVIDIA omniverse replicator [EB/OL]. (2023-05-09)[2023-09-20].https://developer.nvidia.cn/community-training/

[6] Mircrosoft. Rewind the metaverse with data history for azure digital Twins[EB/OL]. (2022-03-29)[2023-09-20].https://techcommunity.microsoft.com/t5/forums/searchpage/tab/message?advanced=false&allow_punctuation=false&q=metaverse

[7] Unity. XR interaction toolkit 0.10 preview is available[EB/OL]. (2022-09-30)[2023-09-20].https://forum.unity.com/threads/xr-interaction-toolkit-0-10-preview-is-available.1000576/

[8] Hu An'an, Zhang Xiangge. Analysis of the action plan for cultivating the "Meta-Universe" new circuit in Shanghai (2022—2025)[J]. Shanghai Information Technology, 2022(10): 6−6(in Chinese)
(胡安安, 张湘仡. 上海市培育"元宇宙"新赛道行动方案(2022—2025 年)解析[J]. 上海信息化, 2022(10): 6−6)

[9] Zhejiang Provincial Development and Reform Commission. Zhejiang Provincial Development and Reform Commission Innovation and

High Technology Development Department[2022]. Notice on the joint issuance of the [Action Plan for the Development of Zhejiang Metaverse Industry (2023–2025)][EB/OL]. (2022-12-15)[2023-09-20].https://fzggw.zj.gov.cn/art/2022/12/15/art_1229123366_2451471.html(in Chinese)
(浙江省发展和改革委员会. 浙发改高技[2022]号关于联合印发《浙江省元宇宙产业发展行动计划(2023—2025年)》的通知[EB/OL]. (2022-12-15)[2023-09-20].https://fzggw.zj.gov.cn/art/2022/12/15/art_1229123366_2451471.html)

[10] Henan Provincial Department of Commerce. Yu ZhengBan [2022] no. 89 Notice on the issuance of Henan Province Metaverse Industry Development Action Plan (2022–2025)[EB/OL]. (2022-09-30) [2023-09-20].https://hnsswt.henan.gov.cn/2022/09-30/2615994.html (in Chinese)
(河南省商务厅. 豫政办〔2022〕89号. 关于印发河南省元宇宙产业发展行动计划(2022—2025年)的通知[EB/OL]. (2022-09-30)[2023-09-20].https: //hnsswt.henan.gov.cn/2022/09-30/2615994.html)

[11] Shenyang. Metaverse development research report version 3.0[R]. Beijing: Tsinghua University, 2021(in Chinese)
(沈阳. 元宇宙发展研究报告 3.0[R]. 北京: 清华大学, 2021)

[12] Peking University HSBC Business School, Essence Securities. Metaverse 2022 —The accumulated power [R]. Beijing: Peking University HSBC Business School, 2022 (in Chinese)
(北京大学汇丰商学院, 安信证券. 元宇宙 2022——蓄积的力量[R]. 北京: 北京大学汇丰商学院, 2022)

[13] China Academy of Science and Education Strategy, Zhejiang University. Exploring the meta-universe [R]. Hangzhou: China Academy of Science and Education Strategy, Zhejiang University, 2022 (in Chinese)
(浙江大学中国科教战略研究院. 探索元宇宙[R]. 杭州: 浙江大学中国科教战略研究院, 2022)

[14] China Institute of Electronic Technology Standardization. Linked metaverse: Research and exploration[R]. Beijing: China Institute of Electronic Technology Standardization, 2022 (in Chinese)
(中国电子技术标准化研究院. 链接元宇宙: 研究与探索[R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2022)

[15] China Academy of Information and Communications Technology. 2022 Meta-universe industry atlas[R]. Beijing: China Academy of Information and Communications Technology, 2022(in Chinese)
(中国信息通信研究院. 2022 元宇宙产业图谱[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2022)

[16] Baidu. Xirang[EB/OL]. (2022-07-15)[2023-09-20].https://vr.baidu.com/product/xirang

[17] NetEase. Yaotai [EB/OL]. (2020-10-21)[2023-09-20].https://yaotai.163.com

[18] Ant Group. Whale-spotting-digital collection[EB/OL]. (2022-05-30)[2023-09-20].https://antchain.antgroup.com/solutions/acdcin

[19] Shen Xiaoling. Theoretical discussion on information consumption[J]. Library and Information Knowledge, 2006(113): 81−84 (in Chinese)
(沈小玲. 关于信息消费的理论探讨[J]. 图书情报知识, 2006(113): 81−84)

[20] Li Ming. Metaverse standardization exploration [R]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2022 (in Chinese)
(李鸣. 元宇宙标准化探索[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2022)

[21] Jung S H, Jeon I O. A study on the components of the metaverse ecosystem[J]. Journal of Digital Convergence, 2022, 20(2): 163−174

[22] RobloxCorp. A large scale analysis of semantic versioning in NPM [EB/OL]. (2023-08-06)[2023-09-20].https://research.roblox.com/publications

[23] Sandbox. What is the metaverse? A guide to the future of the Web[EB/OL].(2023-07-05)[2023-09-20].https://www.sandbox.game/en/blog/what-is-the-metaverse-a-guide-to-the-future-of-the-web/3362/

[24] Park M, Kim Y G. A metaverse: Taxonomy, components, applications, and open challenges[J]. IEEE Access, 2022, 10: 4209−4215

[25] Wang Minjuan, Yu Haiyang, Bell Z, et al. Constructing an edu-metaverse ecosystem: A new and innovative framework[J]. IEEE Transactions on Learning Technologies, 2022(99): 1−13

[26] Zhu Liehuang, Gao Feng, Shen Meng, et al. Research review on blockchain privacy protection[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(10): 2170−2186 (in Chinese)
(祝烈煌, 高峰, 沈蒙, 等. 区块链隐私保护研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(10): 2170−2186)

[27] Gupta A, Khan H, Nazir S, et al. Metaverse security: Issues, challenges and a viable ZTA model[J]. Electronics, 2023, 12(2): 391−403

[28] Holonext. Metaverse 101: Understanding the seven layers of the metaverse [EB/OL]. (2022-03-02)[2023-09-20].https://holonext.com/metaverse-101-understanding-the-seven-layers/#:~:text=Jon%20Radoff%20is%20an%20entrepreneur%2C%20author%20and%20game,that%20describe%20the%20value-chain%20of%20the%20metaverse%20market

[29] Gartner. What is the meta-universe[EB/OL]. (2022-09-23)[2023-09-20].https://www.gartner.com/cn/information-technology/articles/what-is-a-metaverse

[30] Deloitte. The metaverse overview[EB/OL]. (2022-05-26)[2023-09-20].https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/technology-media-and-telecommunications/articles/metaverse-report.htm

[31] Tianfeng Securities. Exploring the metaverse framework: The third revolution of productivity[EB/OL]. (2021-09-14)[2023-09-20]. https://www.doc88.com/p-59239017026647.html (in Chinese)
(天风证券. 探索元宇宙框架: 生产力的第三次革命[EB/OL]. (2021-09-14)[2023-09-20].https: //www.doc88.com/p-59239017026647.html)

[32] China's Electronic Information Industry Development Institute. Metaverse industrial ecological white paper[EB/OL]. (2022-05-12)[2023-09-20]. http://cdn.aqifun.com/UE/202205311601 02_563.pdf (in Chinese)
(中国电子信息产业发展研究院. 元宇宙产业链生态白皮书[EB/OL]. (2022-05-12)[2023-09-20]. http://cdn.aqifun.com/UE/202205311601 02_563.pdf)

[33] Keresztes E, Ildikó K. Web3 powered by blockchain technology [C]//Proc of the 3rd Int Black Sea Modern Scientific Reserch Congress. Samsun: IKSAD Publications, 2022: 368−375

[34] Polygon. 10 things you didn't know about the game industry [EB/OL]. (2022-12-12)[2023-09-20].https://www.polygon.com

[35] Optimism. Tnsitionon-chainvoting[EB/OL]. (2022-12-22)[2023-09-20].https://gov.optimism.io/t/transitioning-to-on-chain-voting/4193/1

[36] Maker DAO. The Maker protocol: MakerDAO's multi-collateral Dai (MCD) system[EB/OL]. (2022-10-11)[2023-09-20].https://makerdao.com/en/whitepaper

[37] Bankless DAO. Tokenized treasuries and an RWA revolution [EB/OL]. (2023-09-03)[2023-09-20].https://www.bankless.com/tokenized-treasuries-and-an-rwa-revolution

[38] Sitnik A. NFT as an object of legal regulation[J]. Actual Problems of Russian Law, 2022, 17: 84−93

[39] Lin W. DeCentralized finance-DeFi[R/OL].2022 [2023-09-20]. https://www.researchgate.net/publication/363566477_DeCentralized_Finance_-_DeFi

[40] Proelss J , Sevigny S , Schweizer D. GameFi—The perfect symbiosis of blockchain, tokens, DeFi, and NFTs [J/OL]. SSRN Electronic Journal, 2023.[2023-09-20].https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1057521923004325

[41] Guidi B, Michienzi A. SocialFi: Towards the new shape of social media[J]. ACM SIGWEB Newsletter, 2022, 2022(5): 1−8

[42] Venugopalan S, Aydt H. Dance of the DAOs: Building data assets as a use case[J]. arXiv preprint, arXiv: 2301.05945, 2023

[43] Liu Nan, Liu Lu. Integration of blockchain and cloud computing to develop BaaS becomes the trend[J]. Communications World, 2017(17): 61−62 (in Chinese)
(刘楠, 刘露. 区块链与云计算融合发展 BaaS 成大势所趋[J]. 通信世界, 2017(17): 61−62)

[44] ISO/TC307 Blockchain and Distributed Ledger Technologies Standards Committee. ISO 22739 2020 Blockchain and Distributed Ledger Technologies-Vocabulary[S/OL]. 2020[2023-09-20].https://www.iso.org/standard/73771.html

[45] Yong Yuan, Wang Feiyue. Blockchain technology development status and prospects[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481−494(in Chinese)
(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)

[46] Li Ming. Blockchain standardization and thinking [R]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2019: 316−340 (in Chinese)
(李鸣. 区块链标准化及思考[R]. 北京: 社会科学文献出版社, 2019: 316−340)

[47] Li Ming, Zhang Liang, Song Wenpeng, et al. Blockchain: The core infrastructure of the metaverse[J]. Computer Engineering: Blockchain Theory and Technology, 2022, 48(6): 24−32,41 (in Chinese)
(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: 区块链理论与技术, 2022, 48(6): 24−32, 41)

[48] Zang Zhipeng, Xie Xuefang. Construction of a meta-universe system with Chinese characteristics: Theoretical construction and path selection[J]. Nanjing Social Sciences, 2022(10): 137−147 (in Chinese)
(臧志彭, 解学芳. 中国特色元宇宙体系建设: 理论构建与路径选择[J]. 南京社会科学, 2022(10): 137−147)

[49] Xu Yu, Yang Wanggong, Zhao Yifei, et al. Research on digital ecological features of the meta-universe[J]. Journal of Beijing Institute of Printing and Technology, 2022, 30(7): 61−65 (in Chinese)
(徐昱, 杨旺功, 赵一飞, 等. 元宇宙的数字生态特征研究[J]. 北京印刷学院学报, 2022, 30(7): 61−65)

[50] Agarwal U, Tandon D, Sharma V, et al. Metaverse technology: An overview[J]. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science, 2022, 4(11): 1287−1289

[51] Xiang Anling, Tao Wei, Shen Yang. Meta-universe ontology: Virtual image world under space-time aesthetics[J]. Film Arts, 2022(2): 42−49 (in Chinese)
(向安玲, 陶炜, 沈阳. 元宇宙本体论——时空美学下的虚拟影像世界[J]. 电影艺术, 2022(2): 42−49)

[52] Huang Kezhen, Lian Yifeng, Feng Dengguo, et al. Network security threat intelligence sharing model based on blockchain[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(4): 836−846 (in Chinese)
(黄克振, 连一峰, 冯登国, 等. 基于区块链的网络安全威胁情报共享模型[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(4): 836−846)

[53] Chen Weili, Zheng Zibin. Blockchain data analysis: Current status, trends and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(9): 1853−1870 (in Chinese)
(陈伟利, 郑子彬. 区块链数据分析: 现状、趋势与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(9): 1853−1870)

[54] Hashash O, Chaccour C, Saad W, et al. Towards a decentralized metaverse: Synchronized orchestration of digital twins and sub-metaverses [J]. arXiv preprint, arXiv: 2211.14686, 2022

[55] Wang Jingyi, Zhang Hongzhong, Dou Weihong. The suppliability of imagination: Analysis and reflection on the relationship between man and the meta-universe scene[J]. News and Writing, 2022(4): 70−78 (in Chinese)
(王競一, 张洪忠, 斗维红. 想象的可供性: 人与元宇宙场景关系的分析与反思[J]. 新闻与写作, 2022(4): 70−78)

[56] Hai Mo, Zhu Jianming. Propagation mechanism combining optimal propagation path and incentive of blockchain network[J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(6): 1205−1218 (in Chinese)
(海沫, 朱建明. 区块链网络最优传播路径和激励相结合的传播机制[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(6): 1205−1218)

[57] Yu Guoming, Chen Xuejiao. Digital assets: A new medium in the meta-universe era— Activation, integration and reconnection of digital assets to the communication value chain[J]. Publication and Distribution Research, 2022(7): 21−27 (in Chinese)
(喻国明, 陈雪娇. 数字资产: 元宇宙时代的全新媒介——数字资产对传播价值链的激活、整合与再连接[J]. 出版发行研究, 2022(7): 21−27)

[58] Wang Yuntao, Su Zhou, Yan Miao. Social metaverse: Challenges and solutions[J]. arXiv preprint, arXiv: 2301.10221, 2023

[59] Schöbel S, Karatas J, Tingelhoff F, et al. Not everything is a metaverse?! A practitioners perspective on characterizing metaverse platforms[C/OL]//Proc of the 55th Hawaii Int Conf on System Science. Hawaii, USA: University of Hawaii, 2023[2023-09-20].https://www.researchgate.net/publication/364344441_Not_everything_is_a_Metaverse_A_Practitioners_Perspective_on_Characterizing_Metaverse_Platforms

[60] Chen Zefeng, Wu Jiayang, Gan Wensheng, et al. Metaverse security and privacy: An overview[J]. arXiv preprint, arXiv: 2211.14948, 2023

[61] Zhu Ke, Ding Tingyin, Fusley. Meta-universe enabled large-scale hyperdomain collaborative learning: System framework and implementation path[J]. Journal of Distance Education, 2022(2): 24−34 (in Chinese)
(朱珂, 丁庭印, 付斯理. 元宇宙赋能大规模超域协同学习：系统框架与实施路径[J]. 远程教育杂志, 2022(2)：24−34)

[62] Zhu Banghua, Karimireddy S P, Jiao Jiantao. Online learning in a creator economy[J].arXiv preprint,arXiv:2305.11381,2023

[63] Tahira T, Zulfikarijah F. Business future with the metaverse[EB/OL]. (2023-01-02)[2023-09-20].https://www.researchgate.net/publication/367183666_Business_Future_With_the_Metaverse

[64] Wang Zhuo, Liu Xiaoguan. Meta-universe: A new social form of space-time reconstruction and the fusion of virtuality and reality[J]. Social Science Research, 2022(5): 14−24 (in Chinese)
(王卓, 刘小莞. 元宇宙：时空再造与虚实相融的社会新形态[J]. 社会科学研究, 2022(5)：14−24)

[65] Yan Zhiying. A comprehensive overview of the fundamental and applications of metaverse[C/OL]//Proc of 3rd Int Conf on Public Relations and Social Sciences. Paris, France: EDP Sciences, 2022 [2023-09-20].https://www.semanticscholar.org/reader/dccfd566196747cda055870e45cc1cd3e94ff307

[66] Zhang Zhenghao, Li Yong, Zhang Zhenjiang. Controllable and accountable sensitive data sharing scheme[J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(12): 2750−2759 (in Chinese)
(张正昊, 李勇, 张振江. 可控、可追责的敏感数据共享方案[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(12)：2750−2759)

[67] Zhang Jingyu, Li Zhihong. Analysis on the alienation of digital identity[J]. Research on Dialectics of Nature, 2018, 34(9): 45−49 (in Chinese)
(张婧羽, 李志红. 数字身份的异化问题探析[J]. 自然辩证法研究, 2018, 34(9)：45−49)

[68] Liu Feng, Yang Jie, Li Zhibin, et al. A secure multi-party computing protocol for data privacy protection based on blockchain[J]. Journal of Computer Research and Development, 2021, 58(2): 281−290 (in Chinese)
(刘峰, 杨杰, 李志斌, 等. 一种基于区块链的泛用型数据隐私保护的安全多方计算协议[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(2)：281−290)

[69] Jin Shixiong, Zhang Xiaodan, Ge Jingguo, et al. Research review of blockchain consensus algorithm[J]. Journal of Information Security, 2021, 6(2): 85−100 (in Chinese)
(靳世雄, 张潇丹, 葛敬国, 等. 区块链共识算法研究综述[J]. 信息安全学报, 2021, 6(2)：85−100)

[70] Li Ming, Qiu Honglin, Xü Quanqing, et al. Research on cross-chain and interoperability of blockchain systems[J]. University Journal of China Posts and Telecommunications, 2021, 5: 1−17

[71] Yin Jichao. A 3D real-person real-time scene interaction system based on VR / AR and AI technology: China, CN202111594738.1[P]. 2022-04-12 (in Chinese)
(殷际超. 一种基于元宇宙 VR/AR 和 AI 技术的 3D 真人实时场景交互系统：中国, CN202111594738.1[P]. 2022-04-12)

[72] Tong Changwei. Analysis of development status and challenges of digital currency under blockchain technology[J]. Engineering and Management Science, 2020, 2(5): 15−16 (in Chinese)
(童长卫. 区块链技术下数字货币发展现状与挑战分析[J]. 工程与管理科学, 2020, 2(5)：15−16)

[73] Zhou Wei, Yuan Xiaowei, Wei Zhiqiang, et al. A Byzantine fault-tolerant hybrid consensus mechanism for alliance chains[J]. Journal of Ocean University of China: Natural Science Edition, 2021, 51(7): 92−100 (in Chinese)
(周炜, 袁晓伟, 魏志强, 等. 一种可应用于联盟链的拜占庭容错混合共识机制[J]. 中国海洋大学学报：自然科学版, 2021, 51(7)：92−100)

[74] Song Wenpeng, Li Ming, Liu Baixiang. Trusted data access and authorization protocol[J]. China Post and Telecommunications University Journal, 2021, 5: 18−26



Li Ming, born in 1975. PhD candidate. Member of CCF. His main research interests include blockchain, metaverse, and Web 3.0.
李　鸣, 1975 年生. 博士研究生. CCF 会员. 主要研究方向为区块链、元宇宙和 Web3.0.



Song Wenpeng, born in 1982. PhD candidate. His main research interests include blockchain, privacy computing, and cryptography.
宋文鹏, 1982 年生. 博士研究生. 主要研究方向为区块链、隐私计算、密码学.



Zong Yan, born in 1975. Bachelor, senior engineer. Her main research interest includes the blockchain and metaverse on healthcare industry.
宗　燕, 1975 年生. 学士, 高级工程师. 主要研究方向为医疗区块链和元宇宙.



Liu Mianchen, born in 1999. Bachelor. His main research interests include blockchain, metaverse, and Web 3.0.
刘冕宸, 1999 年生. 学士. 主要研究方向为区块链、元宇宙、Web3.0.