



元宇宙：概念、技术及应用研究综述

摘要

网络技术、人机交互和人工智能等技术的飞速发展催生了元宇宙,并进一步促进人们物质生活各个方面的数字化转型。2021年是元宇宙元年,元宇宙作为一个新兴的概念受到产业界、学术界、媒体界及公众的广泛关注。本文尝试从技术维度和应用角度深度剖析元宇宙。首先,从定义、起源与发展、特征和关键技术(网络及运算技术、物联网技术、人机交互技术、电子游戏技术、区块链技术、数字孪生技术和其他技术)等多方面对元宇宙的概念及内涵进行论述;然后,讨论了当下布局元宇宙的企业和应用实例;最后,剖析了目前元宇宙发展存在的问题和机遇,并对未来研究与应用进行了展望。通过对元宇宙当前的发展状况、研究趋势进行归纳分析以及科学地评估元宇宙的落地应用,为元宇宙研究人员提供有益的参考和借鉴。

关键词

元宇宙;数字孪生;人工智能;虚拟现实;边缘计算;6G;区块链

中图分类号 TP391;TP183

文献标志码 A

收稿日期 2022-11-29

资助项目 国家自然科学基金(42075007);灾害性天气国家重点实验室开放基金(2021LASW-B19)

作者简介

方巍,男,博士,教授,研究方向为人工智能、计算机视觉、气象元宇宙和气象大数据分析。hsfangwei@sina.com

- 1 南京信息工程大学 计算机学院/数字取证教育部工程研究中心,南京,210044
- 2 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室,南京,210044
- 3 南京信息工程大学 大气环境与装备技术协同创新中心,南京,210044

0 引言

2021年初,被称为元宇宙第一股的罗布乐思(Roblox)在纽约证券交易所正式上市。同年,美国著名社交媒体巨头 Facebook 公司更名为“Meta”并着力开拓元宇宙。与此同时,微软、英伟达、高通、字节跳动、百度、腾讯等科技巨头纷纷布局元宇宙相关产业。自此,元宇宙成为了一个新的风口。那么元宇宙到底是什么呢?元宇宙是一个大的概念,它基于数字空间来实现物理世界、虚拟世界和人类社会的高度融合,包括所有虚拟世界、增强现实和互联网,其核心是对现实真实世界、宇宙的一个虚拟化、数字化。从技术层面上来看,元宇宙的实现依赖于诸多技术,包括网络及运算技术(支持现实世界和虚拟世界之间的数据通信、为虚拟世界中的任务提供计算能力)、物联网技术(将现实世界中的传感器接入虚拟世界、实现万物互联)、交互技术(使得人类能够身临其境地体验虚拟世界,增强用户的感知交互能力)、电子游戏技术(用于创作虚拟世界,丰富虚拟世界的内容)、人工智能技术(提高元宇宙虚拟世界的运行效率和智能化水平)、区块链技术(用于构建虚拟世界的安全可靠、去中心化的经济系统)以及数字孪生技术(实现元宇宙和现实物理世界的相互影响)等。自2021年起,元宇宙已成为全球科技界的焦点,各大科技公司纷纷加入元宇宙行业,具体措施有建立元宇宙研发部门、收购其他元宇宙相关产业独角兽企业、投资其他元宇宙企业等。同时,也引发学术界对元宇宙相关理论的研究热潮。本文就元宇宙的相关概念、关键技术及其应用实例进行剖析,分析了元宇宙机遇与挑战,并给出了未来研究方向,希望能为元宇宙的进一步研究提供参考。

1 元宇宙概述

本部分将从元宇宙的起源、概念及内涵、发展和特征等方面进行归纳和总结。

1.1 元宇宙的起源

1992年,美国作家尼尔·斯蒂芬森(Neal Stephenson)在著名科幻小说《雪崩》(《Snow Crash》)中提到元宇宙(Metaverse)一词。《雪崩》描绘了一个恢弘的虚拟世界,在这虚拟世界里,人类通过个人虚拟现实终端设备,使用其数字化身在现实世界映射的三维空间中进行交互,用户可以像在真实物理世界中一样工作和生活。而这与如今使用

VR 眼镜访问虚拟空间的方式很相似,但后者的应用场景和使用体验远没有科幻小说描绘的那么好.其实在 1981 年美国计算机专家弗诺·文奇教授(Vernor Vinge)的中篇小说《真实姓名》(《True Names》)出版后,与元宇宙类似的概念就以各种名称出现在赛博朋克(Cyberpunk, 又称数字朋克等)类型的小说中.斯蒂芬森在《雪崩》的后记中表示,1986 年上线的 MMO 游戏《栖息地》中就充满了大量元宇宙的元素.之后,元宇宙的概念还出现在 2016 年发布的流行视频游戏《女神异闻录 5》中.

1.2 元宇宙概念与内涵

元宇宙本身没有标准的定义.自 2021 年开始进入大众视野,它才为人们所熟知.广义地讲,元宇宙是人类运用数字技术构建的、由现实世界映射或超越现实世界,可与现实世界交互的虚拟世界,具备新型社会体系的数字生活空间.具体而言,借助于 VR 眼镜,人们可以身临其境地体验的虚拟空间,就是一种元宇宙.目前,元宇宙一词,更多地只是一个大的概念,它本身并没有什么新的技术,换言之,元宇宙是众多科技发展至今的产物,它融合了今天的一大

批先进技术.准确地说,元宇宙不是一个新的概念,它更像是一个经典概念的重生,是在扩展现实(XR)、区块链、云计算、数字孪生、人工智能等新技术混合后的概念具化.自从 2021 年(元宇宙元年)开始,许多专家、研究组织以及相关公司从不同的研究视角给出了元宇宙的定义.目前关于元宇宙的定义颇为繁多,截止 2022 年 11 月,维基百科对元宇宙的定义^[1]是这样的:元宇宙是一个集体虚拟共享空间,由虚拟增强的物理现实和物理持久性虚拟空间融合而成,包括所有虚拟世界、增强现实和互联网的总和.图 1 展示了构成元宇宙的 7 要素.

微软公司认为,元宇宙是“智能云和智能边缘的巅峰之作”,它的本质在于构建一个与现实世界持久、稳定连接的数字世界,元宇宙将让物理世界中的人、物、场等要素与数字世界共享经验^[2].比如,在企业加速数字化转型的过程中,元宇宙可以让人们在数字环境中会面,借助数字替身以及更有创意的协作方式,让人们从世界各个角落,更加自如地沟通交流.

亚马逊公司对元宇宙的定义^[3]是:元宇宙就是

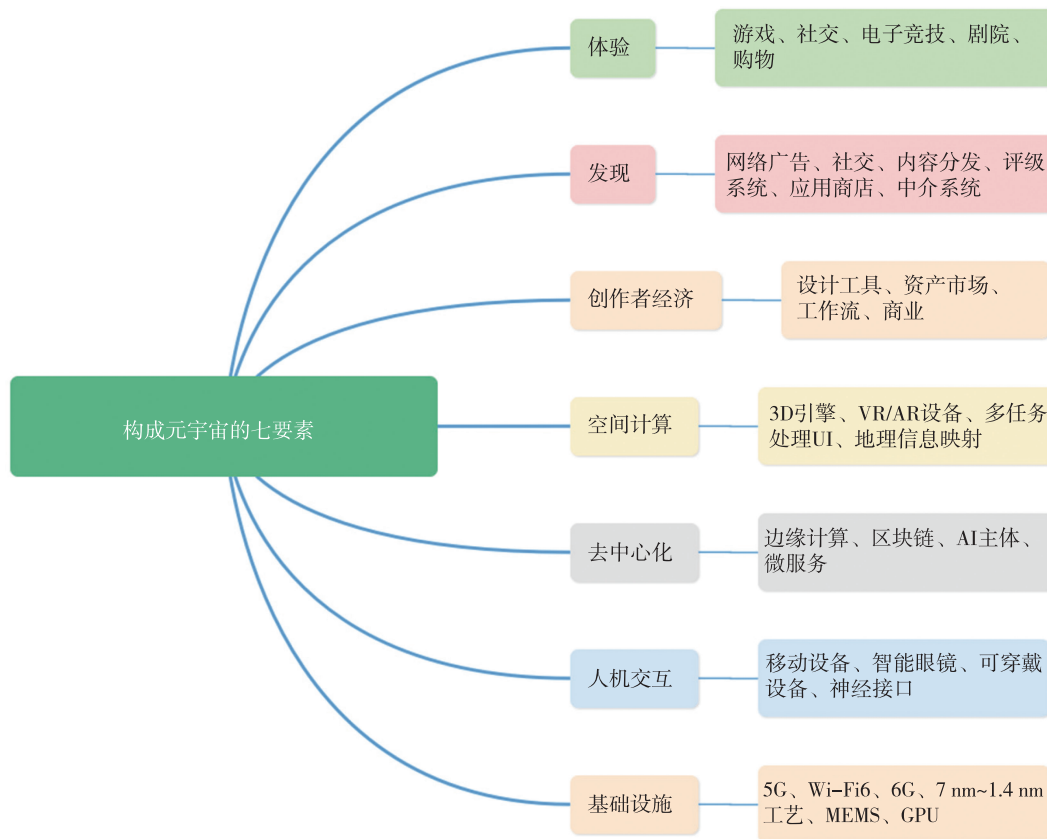


图 1 构成元宇宙的 7 要素

Fig. 1 Seven elements of the metaverse

现实世界中的所有人和事都被数字化投射在了一个云端世界里,你可以在这个世界里做任何你在真实世界中可以做的事情.比如在云端世界跟家人朋友吃饭逛街、用虚拟社交软件交流、浏览虚拟亚马逊商店购物等.

元宇宙概念上市公司 Roblox 认为,元宇宙应具备身份、朋友、沉浸感、低延迟、多元化、随地、经济系统、文明等八大要素^[4].元宇宙的表现形式大多以游戏为起点,并逐渐整合互联网、数字化娱乐、社交网络等功能,长期来看甚至可以整合社会经济与商业活动.

清华大学新闻学院沈阳教授这样定义元宇宙^[5]:元宇宙是整合多种新技术而产生的新型虚实相融的互联网应用和社会形态,它基于扩展现实技术提供沉浸式体验,以及数字孪生技术生成现实世界的镜像,通过区块链技术搭建经济体系,将虚拟世界与现实世界在经济系统、社交系统、身份系统上密切融合,并且允许每个用户进行内容生产和编辑.

中国全国科学技术名词审定委员会将元宇宙定义^[5]为:人类运用数字技术构建的,由现实世界映射或超越现实世界,可与现实世界交互的虚拟世界.

腾讯总裁刘炽平对元宇宙的表述^[6]是:元宇宙是一个令人激动,却也相对模糊的概念,从比较高的角度来审视这个领域,任何让虚拟世界变得更为真实,或者通过虚拟技术让真实世界更加丰富的技术,都可能成为元宇宙概念的一部分.所以腾讯认为这个概念可以为游戏和社交网络行业增添新的增长机会.

目前,元宇宙的定义尚未统一,种类较为繁多,不同组织对元宇宙的定义各有侧重,众说纷纭.本文

认为,元宇宙是一个新的综合性技术概念,基于沉浸式互联网技术、物联网技术、交互技术、电子游戏技术、人工智能技术、Web3.0、数字藏品/NFT (Non-Fungible Token, 非同质化通证)、5G/6G、区块链技术和数字孪生技术等,构建映射真实物理世界的虚拟世界,在这个虚拟世界中,用户可以使用其虚拟化化身进行交互并完成现实世界中对应的任务.特别是在新冠肺炎疫情期间,人们居家办公,使用元宇宙应用进行线上会议,可以拉近用户之间的距离,达到更好的交互效果.当前,元宇宙还处于起步阶段,相关技术还不是很成熟,主要落地应用有 Meta 公司的社交元宇宙、微软公司的工业元宇宙、Roblox 公司的元宇宙游戏、百度的元宇宙产品——希壤等.

1.3 元宇宙的发展

在元宇宙的早期,特别是 20 世纪 90 年代以前,由于相关技术还没有足够成熟可靠,元宇宙的概念仅仅停留在科幻作品中,比如威廉·吉布森的《神经漫游者》(1984 年)、尼尔·斯蒂芬森的《雪崩》(1992 年)等.后来,随着计算机技术和电子游戏技术的快速发展,元宇宙的概念最先在电子游戏上得以实现.2003 年,总部位于美国洛杉矶的 Linden 实验室开发了一款名为《第二人生 (Second Life)》的网络虚拟游戏,该游戏基于元宇宙的概念,为用户提供了一个高层次的社交网络服务.在该游戏中,玩家可以使用其虚拟角色进行社交、参加个人或集体活动、相互交易虚拟财产,这已经初步具备了元宇宙的一些特征.图 2 展示了元宇宙的发展历程.

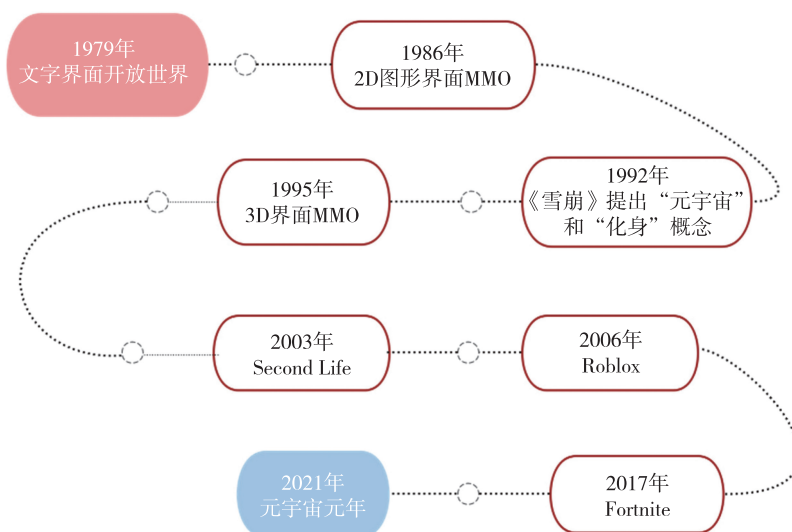


图 2 元宇宙的发展历程

Fig. 2 Development course of the metaverse

之后,随着计算机硬件和网络通信等技术的迅猛发展,CPU 算力和网络带宽得到了巨大提升,终端设备变得更加轻巧便携,这都为元宇宙概念具体应用的落地实现打下了坚实的基础.2010 年后,一体式 VR 眼镜的出现,使得用户可以利用头戴式显示设备沉浸式地体验虚拟世界,而这直接拉近了人类和虚拟世界的距离.在移动互联网的浪潮之下,各种面向 VR 设备的应用软件应运而生,用户可以在 VR 眼镜的软件商店里面下载他们想要的应用并直接体验游玩.目前,VR 软件消费市场最受欢迎的应用还是 VR 游戏,而 VR 游戏是最能够体现元宇宙概念的一个领域.《Roblox》就是 VR 游戏领域的一个最具影响力的代表,它是目前世界上最大的多人在线创作游戏.《Roblox》兼容了虚拟世界、休闲游戏和自建内容的特点,游戏中的大多数作品都是用户自行建立的,它已经具备元宇宙的大多数特征.

2021 年,Facebook、微软、亚马逊、百度、腾讯、字节跳动等科技巨头正式投资布局元宇宙,国内外许多高校和科研院所纷纷设立元宇宙研究院,国内许多城市也出台了鼓励发展元宇宙相关产业的政策和新规,一时间“元宇宙”一词也频繁出现在各大媒体头条上,这标志着元宇宙时代的到来.因此,2021 年也被人们称为“元宇宙元年”.今天,网络通信及云计算、物联网、人机交互、电子游戏、人工智能、区块链、数字孪生等技术已经发展到一定高度,各项基础设施也相对成熟可靠,元宇宙的实现成为可能.

目前,各大科技公司对于元宇宙的研究都倾向于将元宇宙和具体行业结合,比如:微软提出的“工业元宇宙”解决方案,希望借助于微软 Azure 云服务,用元宇宙赋能制造业,提升工业生产效率、节能减排,实现制造业数字化转型,帮助企业提升竞争力;Facebook 公司一直走在探索元宇宙的前列,其创始人马克·扎克伯格表示希望将 Facebook 打造为一家元宇宙公司,目前其元宇宙业务涵盖了办公、游戏、社交、教育、健身等多个领域,未来将不断探索更加多样的元宇宙应用场景;而亚马逊则从底层出发,打造支撑元宇宙应用的强大云计算平台 AWS,为元宇宙的实现提供强大的云计算基础设施;国内电商巨头阿里巴巴对元宇宙的布局,致力于打造电商元宇宙,通过元宇宙技术辅助优化电商场景的体验.

1.4 元宇宙的特征

目前,元宇宙处于起步阶段,不同的组织对于元宇宙的特征定义各有差别.元宇宙上市公司

Roblox^[4]认为,元宇宙包含 8 大特征要素:身份、朋友、沉浸感、低延迟、多元化、随时随地、经济系统和文明.世界四大会计事务所之一的德勤公司^[7]分析认为元宇宙主要具有 5 大特征:逼真的沉浸体验、完整的世界结构、巨大的经济价值、新的运行规则、潜在的不确定性.北京大学陈刚教授等^[8]梳理并系统界定了元宇宙的 5 大特征与属性,即社会与空间属性、科技赋能的超越延伸、人机与人工智能共创、真实感与现实映射性、交易与流通.元宇宙的主要特征如图 3 所示.



图 3 元宇宙的主要特征

Fig. 3 Main features of the metaverse

综上所述,本文将元宇宙主要特征概括为以下 3 点:

1) 平行于现实世界 (Parallel to the real world). 元宇宙本质上是对现实世界的映射,元宇宙对应的虚拟世界中的事物是真实世界中事物的副本,它们之间存在一一对应的关系.当现实世界中的某一变量改变时,作为其映射的虚拟空间中的对应副本也会跟着变化.例如,在映射工厂的数字孪生系统中,当工厂的环境温度从 20 °C 升温至 23 °C 时,数字孪生系统构建的虚拟空间中的环境温度也会从 20 °C 升温至 23 °C.

2) 反作用于现实世界 (React to the real world). 元宇宙是对现实世界的虚拟化、数字化过程.在某些应用场景下,人们利用元宇宙构建的虚拟世界对未来做预测分析,以期达到规避风险、寻求利润最大化的效果,与此同时,这对现实世界的未来产生了间接的影响.例如,气象部门使用数字孪生技术构建特定区域的虚拟空间,仿真模拟该区域在极端天气状况下的多要素特征变化情况,用来预防气象灾害、辅助制定灾害预防措施.

3) 综合多种技术 (Integrate multiple technologies). 元宇宙并非单一的一种技术,它融合

了许多先进技术.元宇宙的发展是在共享的基础设施、标准及协议的支撑下,由众多工具、平台不断融合、进化而最终成形的^[9].元宇宙基于网络及运算技术实现虚拟世界和现实世界的高速通信、泛在连接以及资源共享,基于物联网技术实现终端设备与虚拟世界的数据传输,基于人机交互技术(包括VR、AR、MR、XR等)为用户提供沉浸式体验,基于电子游戏技术构建虚拟世界,基于人工智能技术提升虚拟世界的智能化水平,基于区块链技术构建虚拟世界的安全可靠的经济体系.

2 元宇宙的关键技术

元宇宙作为一种新的技术概念,以用户为中心,是一种综合了当前几乎所有软硬件技术的互联网应用^[10],它是信息化发展的一个新的阶段.元宇宙在综合运用现有的先进技术的同时,也会推动相关技术的迭代升级,甚至是催生出新的技术.它运用了多种先进技术,其中以网络及运算技术、物联网技术、交互技术、电子游戏技术、5G/6G、人工智能技术、区块链技术和数字孪生等技术最为关键,当然还有一些如创建身份系统与经济系统的技术、内容创作技术和治理技术.下面分别介绍元宇宙的一些关键技术.表1展示了元宇宙的关键技术及其在元宇宙中的作用.

2.1 网络及运算技术

网络及运算技术是元宇宙的基石.在元宇宙概念的应用场景下,访问系统数据库、和现实世界的终端设备进行实时数据传输、用户在虚拟空间中进行实时交互等相关常规操作,都需要低延迟大带宽的高质量网络和高性能的计算平台的支撑.本节主要介绍5G/6G、云计算、边缘计算在元宇宙中的应用.

1) 5G、6G 高速无线传输服务.无论是远程执行

计算繁重的任务、访问大型数据库,还是在用户之间提供共享体验,都离不开网络与通信,元宇宙时代所需要的沉浸式体验,要求网络具有低延迟、大带宽、高可靠性等特点.5G作为新一代信息化基础设施,其上网速率^[11]高达1 GB/s,时延低至1 ms,连接能力可达到100万连接/km².而元宇宙需要大量带宽来实现实时传输高分辨率的内容,5G完全可以满足其性能指标,同时为元宇宙的落地应用提供了重要的网络基础.目前,随着5G的商业化应用趋于普及,越来越多的行业正在享受5G带来的便利.

然而,目前的5G技术仍存在一些不足,影响着元宇宙应用的用户体验感,比如复杂环境下的信号干扰、网络拥塞等问题,对此,相关学者进行了深入研究.Park等^[12]针对高移动性环境下(5G车载网络中)的最优干扰管理问题,提出了一种基于深度强化学习的资源分配方法,采用远程无线电头分组和车辆聚类的方式,在考虑服务质量和可靠性的同时最大化系统能效.Kottursamy等^[13]提出了一种基于eNB/gNB感知的数据检索算法和基于Livelity和Size的数据替换算法,有效地对数据项进行细化、排序和缓存,将频繁访问的数据归档在5G核心网或无线电接入网内,可以减少冗余的移动流量.实验分析表明,该模型在5G网络中具有较低的延迟、较低的拥塞和较高的缓存命中率.Kulkarni等^[14]提出了一种在5G技术中缓解大规模多输入多输出(MIMO)系统干扰的技术——分数序列似然上升搜索方法(SLAS),该团队提出的干扰抑制方法完全消除了信号中的干扰,传输信号的质量没有任何延迟或损失,在最小误码率、误码率和吞吐量等指标中获得了优越的性能.

与此同时,第六代移动通信技术6G正处于开发阶段,6G的传输能力可能比5G提升100倍,网络延迟也可能从毫秒降到微秒级.未来的6G网络将是一

表1 元宇宙的关键技术及其在元宇宙中的作用

Table 1 Key technologies of the metaverse and their functions

元宇宙关键技术	在元宇宙中的作用
网络及运算技术	元宇宙的能量,为元宇宙提供高速通信和共享资源等功能
物联网技术	连接元宇宙的一切,实现虚拟世界与现实世界的泛在连接,是构建虚实交互和万物互联的信息桥梁
人机交互技术	元宇宙的出入口,提供进入虚拟世界的设备接口,为用户提供沉浸式的体验
电子游戏技术	为元宇宙的内容制作提供了强大的技术支持
人工智能技术	端到端的智能,为元宇宙应用场景提供技术支持,提升虚拟世界的运行效率和智能化水平
区块链技术	元宇宙的定海神针,为构建安全可靠的元宇宙世界的经济体系提供技术保障
数字孪生技术	虚实融合的桥梁,对物理实体进行数字复制,实现元宇宙和物理世界的映射和相互影响
其他技术	创建身份系统、经济系统技术、内容创作技术、治理技术和数字人技术等,元宇宙社会所需相关技术

个地面无线与卫星通信集成的全连接世界, 6G 通信技术不再是简单的网络容量和传输速率的突破, 它更是为了缩小数字鸿沟, 实现万物互联这个“终极目标”。未来, 随着 6G 技术的逐步成熟与商业化应用, 元宇宙世界与物理世界的交互延迟将大大降低, 用户在元宇宙世界的感知体验也将大大改善。

Jeyakumar 等^[15]为解决 6G 网络中波束分裂效应会导致整个带宽上的严重阵列增益损耗的问题, 提出了 6G 室内网络部署中太赫兹大规模 MIMO 的宽带混合预编码技术, 是实现未来 6G 室内通信网络部署的有效技术。Zhang 等^[16]提出了一种联合流量负载均衡和干扰缓解框架, 以最大限度地提高 6G 蜂窝物联网业务的网络容量。他们通过迭代优化用户设备关联和发射功率分配 (PA), 设计了一种新颖的两步资源分配方案。此外, 为了最小化回程负担和干扰, 设计了一种使用多对多匹配模型的新型回程容量和干扰感知匹配实用程序函数来测量干扰惩罚和回程容量。Lin 等^[17]设计了一个支持动态资源分配的 6G 大规模物联网架构。该团队首先构建动态嵌套神经网络, 在线调整嵌套学习模型结构, 满足动态资源分配的训练需求, 然后针对基于嵌套神经网络结合马尔可夫决策过程训练的 6G 大规模物联网, 提出一种 AI 驱动的协同动态资源分配 (ACDRA) 算法。实验结果表明, 与现有 3 种参考算法相比, ACDRA 将平均资源命中率提高了约 8%, 平均决策延迟时间缩短了约 7%。

2) 云计算在元宇宙中应用研究。在虚拟世界和现实世界的交互、用户之间的交互以及元宇宙应用的运行过程中都会产生难以估计的海量数据, 这都需要云计算的支持^[18]。云计算对于元宇宙应用的支撑作用主要体现在数据处理和数据存储两个方面。在执行一些计算繁重的任务时, 由于终端设备的算力有限, 元宇宙应用还需要借助于云计算平台的强大算力, 实现大数据的高效处理。同时, 由于终端设备的存储容量有限, 海量的数据需要云计算平台来实现分布式存储。近年来, 不断发展的云计算技术为元宇宙的落地应用提供了底层技术支撑。

Sarosh^[19]为构建可信赖和安全的云计算环境, 提出了云计算环境中基于机器学习 (ML) 的虚拟化基础设施混合入侵检测方法, 该方法使用混合算法: SVM (支持向量机) 和 K 均值聚类分类算法, 用于提高异常检测系统的准确性。与早期方法相比, 此方法具有更高的准确性。Chraïbi 等^[20]为了应对云计算服

务器使用量极少、大量的执行时间被丢失的问题, 利用深度 Q 网络 (DQN) 算法, 建立了一种改进的最小云调度 (CS) makespan 调度算法。为了增强 DQN 模型的收敛性, 该团队推荐了一种新的奖励函数, 其所推荐的 MCS-DQN 调度器在最小化完工时间度量和其他同类调度器 (任务等待时间、虚拟机资源使用情况以及与算法的不一致程度) 方面表现出最优的调度结果。Smara 等^[21]提出了一种利用分布式恢复块 (Distributed Recovery Block, DRB) 机制构建可靠可用云计算组件的形式化框架, 其目的是通过构造故障掩蔽节点, 提供一种通过软硬件故障的统一处理来增强云服务可靠性的策略。一个故障掩蔽节点适用于处理 (即故障的检测和容忍) 软件、硬件和响应时间故障, 既使用验收测试, 又使用试块, 同时保证安全和活性属性。该方法能够同时满足云计算系统的高可靠性、高可用性和高 QoS 裕度的要求。Muteeh 等^[22]提出了一种面向云计算环境的多资源负载均衡算法 (MrLBA)。该算法基于蚁群优化算法 (ACO), 在保持较好的负载均衡系统的同时, 以制造跨度、成本为目标, 通过保持资源间的负载均衡, 减少了执行时间和成本, 有效地利用了可用资源。

3) 边缘计算在元宇宙中的应用研究。在某些情况下, 边缘终端设备在将本地计算任务提交到云计算服务器时, 往往需要占用大量网络带宽, 当终端设备和云服务器距离较远时, 网络延迟会大大增加, 这无疑会影响用户的体验感。边缘计算在最接近最终用户和设备的地方计算、存储和传输数据, 可以大大减小用户体验的时延。目前, 边缘计算正处于快速发展阶段, 越来越多的学者开始研究边缘计算并将其与具体行业相结合, 为其他领域的通信问题提供了新的解决思路。

Almasri 等^[23]提出一种分布式移动边缘计算中任务分配的多目标优化解方法, 在最小化边缘设备能耗和任务计算时间的同时, 将不同的应用任务分配给不同的边缘设备。任务依赖和数据分布在一个新的更一般的 MEC 模型中被考虑。多目标进化算法 (MOEA) 框架用于求解受截止期和功耗约束的优化问题。与单目标方法相比, 该团队所提出的多目标方法在能量和计算时间上都有较好的表现。Chen 等^[24]提出了一种基于无监督深度学习的多用户移动边缘计算 (MEC) 框架, 通过将任务卸载到边缘服务器来降低能耗和计算量。该团队提出了一种新的二进制计算卸载方案 (BCOS), 设计了一个带有辅助网络的

深度神经网络(DNN),利用辅助网络作为教师网络,学生网络可以获得联合训练阶段的无损梯度信息.仿真结果表明,BCOS通过低复杂度的训练网络解决二进制卸载问题是有效的.Rodrigues等^[25]提出了一个基于网络孪生(Cybertwin)的多址边缘计算系统总服务延迟的数学模型,该模型包括用户移动、虚拟服务器迁移、不同网络层的多个物理服务器,以及前回程通信、处理和内容请求/缓存.他们还提出了在多址边缘计算场景中指导Cybertwin和控制平面操作的算法.仿真结果表明,Cybertwin由于具有更高的合作度,以更快的整体服务的形式为假设场景带来了显著的改善.这里的模型和仿真是根据未来网络的特点设计的,超越了目前的5G技术,考虑到这些特点,使得它们可能与未来网络相关.在未来网络中,多址边缘计算和物联网将发挥更重要的作用.

2.2 物联网技术

元宇宙框架下的虚拟世界和真实物理世界的泛在连接,需要众多传感器、智能终端等物联网设备提供数据采集、处理和传输等功能的支持^[26].因此,物联网技术是元宇宙虚实交互和万物互联的技术基础,是虚拟世界和现实世界沟通连接的信息桥梁.目前,用户接入元宇宙虚拟世界主要也是依靠物联网终端设备,比如VR一体机、智能手机等.计算机硬件和物联网技术的进一步发展,将推动虚拟终端设备的小型化和便携化,使得用户随时随地只要使用相应的智能终端设备就可以接入元宇宙虚拟空间,这打破了时间和地理空间的限制,能够带给用户更好的体验感.目前,面向终端用户的物联网设备在传输延迟、能耗管理等方面仍有待提高,近几年来学者们和研究组织在这方面进行了大量的研究.

Gao等^[27]为解决工业物联网中设备训练延迟较大的问题,提出了一种针对FL的资源分配方案,即RaFed.该团队将减少训练延迟问题转化为一个优化问题,证明了该问题是NP-hard问题,并提出一种启发式算法来选择合适的设备,以便在干扰和收敛时间之间取得很好的折中.该团队在IoT系统中使用RGB-D数据集进行实验.实验结果表明,与目前的工作相比,RaFed显著降低了29.9%的延迟.Rodriguez-Pabon等^[28]基于AVC(自动化农业价值链)环境中最有影响力的变量提出了一种自适应采样周期方法,以节省物联网设备的能量并保持理想的传感质量,特别是用于温度和湿度监测.在真实场景(咖啡作物)上的评估表明,与传统的固定速率方法相比,

所提出的自适应算法在保证数据准确性的同时,可以减少高达11%的电流消耗.Karthick等^[29]基于麻雀的觅食、群体智慧和反捕食特性,提出了基于麻雀搜索算法的资源管理(SSARM)方案,用于将物联网中多个资源潜在分配到网关.这种SSARM方案将搜索空间中的开采和探索程度优化到可接受的水平.仿真结果表明,与现有方案相比,该方案的吞吐量提高了23.82%,时延降低了18.21%,能耗降低了20.28%.

2.3 人机交互技术

人机交互技术(Human-Computer Interaction, HCI)是元宇宙应用中最重要的一项技术之一,这是用户能够直接感受到的技术,主要包括虚拟现实技术(VR)、增强现实技术(AR)、混合现实技术(MR).目前,用户体验元宇宙虚拟世界最常见的方式就是使用VR眼镜,在视觉和听觉上和虚拟空间融为一体.VR眼镜是利用头戴式显示设备将人的对外界的视觉、听觉封闭,引导用户产生一种身在虚拟环境中的感觉.目前,虚拟现实头戴显示器设备所涉及的相关技术已相对成熟,虚拟现实终端设备也已面向消费市场普及.随着元宇宙概念的流行,VR产业再一次迎来了春天,针对虚拟现实等的人机交互技术的研究也在不断地深入.

Jiang等^[30]为应对VR系统的感知设备或价格昂贵或精度低或难以进行多种交互等问题,利用Ultragloves这个低成本的交互系统,使用麦克风植入的手套来提取手势.通过具体设计的信号,能够以相对准确的方式得到距离和方向,设计了一个类似CNN-LSTM的学习算法来提取手势.此外,该团队为了提高识别的准确性,还设计了一种过滤算法来滤除噪声数据.实验结果表明,该方法结合相位和频率特征,可以识别出4个微手势,准确率达到82%.Fu等^[31]针对现有的可视化场景的VR方法存在渲染效率低、用户体验差等缺点,提出了一种基于高斯模糊的VR洪水场景的隧道视觉优化方法,研究了感兴趣区域(ROI)计算和考虑人眼视觉系统特性的隧道视觉优化等关键技术.实验结果表明,采用该方法在洪水VR场景中绘制的三角形数目减少了约30%~40%,平均帧率稳定在每秒约90帧,显著提高了场景绘制效率.

Marchesi等^[32]针对创建AR无标记应用时缺乏对其环境的语义理解的问题,创建一个利用ORB-SLAM2生成3D地图的SLAM系统,并利用源自

Fast-SCNN 网络的语义知识对其进行丰富.此方法的创新点是使用了一种改进神经网络预测的新方法,用于平衡高效实时模型引入的精度损失.实验结果表明,与普通的 AR 应用相比,该系统功能的效率和实时的可操作性得到了很大的提升.Google 公司在 2010 年收购了 VoIP 软件开发商 Global IP Solutions 的 GIPS 引擎^[33],并改为名为“WebRTC”,在此基础上开发出了区域实时语音技术,这是一种可以在游戏虚拟空间内模拟真实世界实现语音传播距离状态并实现语音交流的技术.目前,该技术已经应用在《鹅鹅鸭》(《Goose Goose Duck》)游戏中,这是一款具有区域语音功能的狼人杀类语音社交推理游戏,可以让参与者在真实的地点享受身临其境的体验^[34].借助于区域实时语音技术,玩家控制的游戏角色在彼此间隔距离较近的游戏进行场景中(非推理投票阶段)可以通过语音交流接触并由此完成身份判断和击杀.未来,将区域实时语音技术推广到元宇宙应用游戏上,势必会大大提升用户的体验感,增强用户在虚拟世界中的感知能力.

2.4 电子游戏技术

电子游戏技术通过游戏引擎、实时渲染和三维建模,在虚拟世界中构建真实物理世界的映射对象,它是目前元宇宙应用最直观的表现方式.目前,元宇宙的应用大多以 VR 游戏呈现,其底层依赖的就是我们熟知的电子游戏技术.元宇宙游戏^[35]同现实世界高度同步、高保真,同时运用 VR、AR、XR 等技术,加强虚拟空间和现实世界的密切联系,增加人机交互、提高游戏体验和游戏使用者的沉浸感.目前,这方面做的比较好的是 Roblox 游戏公司,该公司于

2006 年发行的沙盒游戏 Roblox 结合了虚拟世界、休闲游戏和自建内容,游戏中的大多数作品都是用户自行建立的.为了兼容 VR,Roblox 优化了专门用于 VR 的摄像头控制,降低加速速度,增加了第一和第三人视角之间的切换选项.至 2019 年,已有超过 500 万的青少年开发者使用 Roblox 开发 3D、VR 等数字内容,吸引的月活跃玩家超 1 亿人.Roblox 也成为了世界最大的基于虚拟世界的多人在线创作游戏.

2.5 人工智能技术

人工智能(Artificial Intelligence, AI)作为元宇宙的最重要的核心技术,其地位不言而喻.人们进入元宇宙后,会以数字化身存在并活动,而数字化身在视觉、听觉、触觉等全方位感知能力就离不开 AI 技术,如 AI 驱动的计算机视觉、自然语言处理、数字触觉等已经有了切实可行的落地应用.AI 技术基于海量的数据,进行模型训练以获得最小的损失,使得神经网络的输出值不断逼近真实值,从而达到分类或预测任务所要求的精度,将人工智能技术赋能元宇宙,可以对元宇宙应用起到性能改善和优化的效果.可以说,人工智能技术是由大数据驱动的,而元宇宙应用在运行过程中也势必会产生海量的数据,二者相辅相成、相得益彰.近年来,学术界和工业界对此进行了深入研究并取得了一定的成果.图 4 展示了一个典型的神经网络架构.

英伟达公司^[36]基于 AI 深度学习,研发了深度学习超级采样(DLSS)技术,该技术通过降低游戏内的渲染分辨率,同时通过人工智能算法模型和 AI 加速硬件单元(Tensor Core)来拉伸输出画面,提高显示分辨率,可以让用户在不花费额外成本的情况下

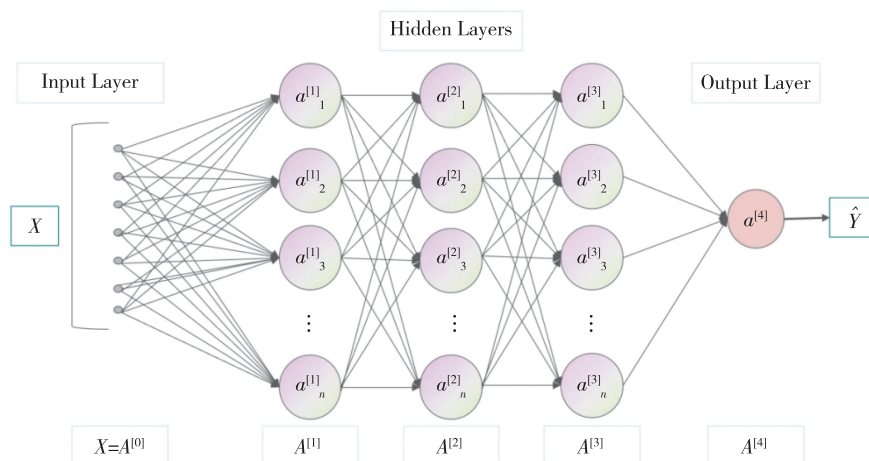


图 4 神经网络的架构

Fig. 4 Architecture of neural network

运行更高分辨率和更高帧率的游戏.该技术已经被许多热门游戏所支持,包括《赛博朋克 2077 (Cyberpunk 2077)》和《堡垒之夜 (Fortnite)》等热门游戏大作.未来,将 DLSS 技术推广到元宇宙虚拟现实应用中,可以给用户带来更好的体验感. Almahasneh 等^[37]提出了一个多任务深度学习框架,该框架利用图像波段之间的依赖关系来产生 3D AR 定位(分割和检测),其中不同的图像波段(和物理位置)有自己的一组结果.此外,为了解决为训练监督机器学习(ML)算法生成密集 AR 注释的困难,该团队以递归方式调整了基于弱标签(即边界框)的训练策略.此框架在所有模式下平均实现了 0.72 IoU(分割)和 0.90 F1 分数(检测),相比之下,在人工数据集上的得分分别为 0.53 和 0.58,AR 检测任务中的 F1 得分为 0.84,而基线 F1 得分为 0.82,精度提升明显.

Haridas 等^[38]为解决因通道降级、不匹配和噪声,以及语音识别系统的性能会迅速下降的问题,提出泰勒-深度信念网络(Taylor-DBN)分类器,即在现有 DBN 分类器中对梯度下降(GD)算法进行泰勒级数的修改,使用 TensorFlow 语音识别数据库、真实数据库和 ESC-50 数据集对该分类器进行训练和测试,结果表明,与现有的传统方法相比,Taylor-DBN 提供了更好的性能.Tajbakhsh 等^[39]提出了一种基于名人的朋友推荐系统(MACeRS)的方法,该方法基于用户及其朋友的喜好和倾向,同时引入了一种将推荐过程抽象为一个由两个主代理(名人与非名人)组成的博弈论问题,用于选择拥有超过 1 万名粉丝的成员作为名人进行推荐.该团队利用推特社交网络名人会员的真实数据对此方法进行了测试和分析,结果显示,MACeRS 推荐的几乎所有项目都是名人(99%).此外,MACeRS 的准确性明显优于其他基线方法.

此外,在应用气象领域,人工智能技术也逐渐崭露头角.2015 年,香港科技大学的 Shi 等^[40]首次提出 ConvLSTM 网络并应用在短临降水预报上.该团队将短临降水预报定义为一个时空序列预测问题,其中输入和预测目标都是时空序列.通过扩展全连通 LSTM(FC-LSTM),使其在输入到状态和状态到状态的转换中都具有卷积结构,该团队提出了卷积 LSTM(ConvLSTM),并利用它建立了短临降水预报问题的端到端可训练模型.实验结果表明,ConvLSTM 网络能够更好地捕捉时空相关性,且始终优于 FC-LSTM 和 ROVER 算法.Wang 等^[41]提出了一种基于 U 型注

意力机制的 Transformer 网络(UATNet),可实现气象卫星云图像的像素级分类.该模型有效地整合了云的空间和多通道信息,利用若干改进自注意力计算(SwinTransformer 块)和补丁合并运算的 Transformer 块来构建分层 Transformer,并引入空间位移来构建远距离跨窗口连接.此外,该团队引入了带 Transformer 的通道交叉融合(CCT)来指导多尺度通道融合,并设计了一种基于注意力的挤压和激励(ASE)机制,以有效地将融合的多尺度通道信息连接到解码器特征.实验结果表明,与现有模型相比,该方法的分割性能更加精确,在气象卫星云识别任务上具有较大优势.

气象在保障生命安全、生产发展、生活富裕、生态良好中发挥日益重要作用,而人工智能、元宇宙等智慧气象服务技术的应用,必将助力气象高质量发展.可以毫不夸张地说,元宇宙不只是游戏,未来它将给天气预报和气象灾害预报预警带来创新并超出我们的想象.

2.6 区块链技术

区块链技术的快速发展,为构建虚拟世界安全高效的经济体系提供了技术支撑.区块链是一种分布式数据库^[42],数据存储在块中,而不是传统的结构化表.用户生成的数据填充到一个新块中,该块将进一步链接到以前的块.所有区块都按时间顺序链接.用户在本地存储区块链数据,并使用一致模型与存储在对等设备上的其他区块链数据同步.用户被称为区块链中的节点,每个节点在链接后维护区块链上存储的数据的完整记录.如果一个节点出现错误,可以引用数百万其他节点以更正错误.因此,在区块链技术下,数据的安全性得到了保证.在元宇宙的经济系统中,区块链技术^[43]能够运用于金融交易、数字版权确认、提升供应链管理效率等方面,真正实现了核心的去中心化.近年来,学者们和研究组织对区块链技术的研究不断加深,取得了一些瞩目的成果.

Prasanna 等^[44]利用连通支配集的概念建立云 MANET 节点的虚拟骨干网,并引入一种轻量级的安全方案,以避免黑洞和灰洞攻击.该算法采用 Q 学习技术对节点的容量进行学习,建立云 MANET 中的连通支配集(CDS).整个设置都是用公钥基础设施建立的,以模拟基于区块链的安全.智能契约的概念用于确保记录每一个事务,发现并消除 CDS 中的任何受损节点.Bandara 等^[45]为解决集中存储平台存在隐

私泄露的问题,构建了一个基于区块链和自主身份的数字身份平台 Casper,这里客户的实际身份凭证存储在自己的移动钱包应用程序上.系统只在其基于区块链的分散存储系统上存储凭证的证明.Casper使用零知识证明机制从凭证证明中验证身份信息.据研究表明,该系统具有可扩展性,能够产生高事务吞吐量.Rehman 等^[46]提出了一个基于区块链的CDFL系统框架 TrustFed,用于检测模型中毒攻击,启用公平的培训设置,并维护参与设备的声誉.TrustFed通过检测并从训练分布中移除攻击者提供公平性.它使用区块链智能合约来维护参与设备的声誉,迫使参与者提供积极和诚实的模型贡献.该团队在大规模工业物联网数据集和多个攻击模型上进行了测试,发现 TrustFed 在多个方面都比常规基线方法产生更好的结果.

2.7 数字孪生技术

数字孪生(Digital Twin)^[47]是充分利用物理模型、传感器更新及运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程.简言之,数字孪生就是运用计算机技术对现实世界做数字复制的过程.目前,数字孪生技术已经相当成熟,并广泛应用于产品设计、产品制造、工程建设等领域.基于数字孪生技术能够虚拟仿真物理世界的特性,人们可以实现元宇宙和真实世界之间的虚实交互.可以说,数字孪生是构建元宇宙世界的基础,是实现元宇宙的核心技术.最近,有不少学者和企业用数字孪生赋能传统行业(特别是气象灾害预测、水文检测等领域),并取得了一些瞩目的成果.

邹海林等^[48]为应对澳门风暴潮灾害发生频率高、影响范围大的问题,以数字孪生和智慧海洋为基础,提出澳门海岸带数字孪生系统构建设想,运用数字孪生、大数据、人工智能等新技术,开发适用于澳门的精准化模拟、智慧化决策风暴潮预测系统.黄艳等^[49]以长江流域防洪应用为例,以实现流域模拟、预报预警、水工程智能调度、防洪风险评估、系统构建等功能为目标,阐述了数字孪生长江建设的总体架构,探索了数据建设、算力建设、智能建设、平台建设等数字孪生流域构建关键技术.他们的研究成果在数字孪生长江建设中得到应用,实现了洪水预报、预警、预演、预案以及工程智能调度全过程模拟,为精准应对2020年流域性大洪水提供了技术支持.李强^[50]针对现有城市洪涝灾害评估与预警系统感知

与动态响应能力不足、决策实时性差等问题,基于数字孪生技术提出了包含物理城市、虚拟城市、智能服务、孪生数据、虚实交互5个模块的城市数字孪生体模型,并分析了城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统.研究分析表明,该数字孪生系统能够实现城市洪涝灾害的自动监测预警、实时智能指挥调度等功能.徐瑞等^[51]基于数字孪生技术的概念,利用现有三维GIS可视化技术手段,结合时空数据模式,构建了一套三维可视化水利安全监测系统.仿真实验结果表明,该系统能够直观展示数字三维地理空间中的地形、地貌、安全监测相关模型信息,以及扩展的分析、查询数据结果,并能够使用这些数据进行一定的三维数据仿真可视化效果表达.该系统增加了数据展示分析手段,提高了分析监测数据效率.

2.8 其他技术

元宇宙除了上述主要支撑技术以外的,还有一些如创建身份系统与经济系统的技术、内容创作技术、数字人和治理技术等.元宇宙作为一个虚拟世界,同样需要具有现实世界所需要的法律、法规、道德等约束,元宇宙不是法外之地.在目前元宇宙的发展阶段,已凸显出了亟待解决的问题,如数字经济、数字财产、数字身份、数字藏品的炒作和丢失,以及个人隐私信息的泄露等.另外,内容是吸引用户进入元宇宙的主要原因,通过内容创作技术,元宇宙可以率先落地教育、培训、艺术、影视、文旅、社交、游戏等领域,从而构建元宇宙繁华景象.

数字人可以说是当下最前沿、最时尚的元宇宙技术产品.数字人是指以数字形式存在于数字空间中,具有拟人或真人的外貌、行为和特点的虚拟人物,也称之为虚拟形象、数字虚拟人、虚拟数字人等.数字人的核心技术主要包括计算机图形学、动作捕捉、图像渲染、AI等(见《数字人产业发展趋势报告(2023)》, <https://mp.weixin.qq.com/s/03zeEpsDIK1ks3MDPr98Q>).数字人不仅有逼真的人的外貌,还能很好地模拟人的行为,甚至还具备一定程度人的思维.在技术维度上,数字人是多种前沿科技的集大成者;在艺术上,数字人的制作和表现也需要极高的审美.数字人可以打造更完美的人设,为品牌带来正向价值.互联网、金融、电商平台、消费品牌、汽车出行等领域纷纷推出数字人,用于品牌营销、智能客服等方向.从2020年开始,大量的网红数字人出现,尤其2022年冬奥会期间,数字人在手语解说、节目直播等众多场合亮相,扩大了公众对数字

人的认知普及,进一步推动了元宇宙产业的发展。

医生同病人交谈内容多且杂乱,聘请速记员需要额外经费,谷歌利用现有的技术,建立了自动语音识别系统,对医疗场景中的对话进行高级编写和标记等^[52]。通俗来讲,该系统的功能就是自动把医生和病人间的对话转录为文字。谷歌的语音识别技术已经应用在其他领域,例如智能家居设备、谷歌翻译等。这些新兴技术的出现也为元宇宙的发展提供新的机遇。

3 元宇宙应用现状

元宇宙是高度沉浸且永续发展的三维时空互联网,是人机融合三元化的多感官通感的体验互联网,是能够实现经济增值的三权化的价值互联网。同时,元宇宙^[53]是整合多种新技术产生的下一代互联网应用和社会形态,它基于扩展现实技术和数字孪生实现时空拓展,基于 AI 和物联网实现数字人、自然人和机器人的人机融合,基于区块链、Web3.0、数字藏品/NFT 等实现经济增值。在社交系统、生产系统、经济系统上虚实共生,每个用户可进行世界编辑、内容生产和数字资产自我所有。下面就当前元宇宙相关主要研究团队和组织的研究进展情况进行对比分析,为元宇宙相关研究提供参考。

3.1 国际上相关的研究组织

目前,国外对元宇宙的研究主要集中在商业应用领域,推动元宇宙研究发展的组织以企业为主,较为知名的涉足元宇宙研究的公司有 Meta、微软、英伟达、谷歌、高通。由于目前元宇宙还处于起步阶段,现阶段研究现状呈现为诸多科技巨头纷纷投入巨资入局元宇宙、设立元宇宙研发部门、不同领域的企业强强联手合作推动元宇宙和各自领域的结合发展等,同时各大公司在元宇宙方向上还处于研发阶段,成

熟可靠的元宇宙商业应用项目屈指可数。国际上元宇宙的主要研究组织及研究方向如表 2 所示。

2022 年初,英伟达公司^[54]推出其首款软件和基础设施即服务产品 NVIDIA Omniverse Cloud,供艺术家、开发人员和企业团队设计、发布、运营和随时随地体验元宇宙应用。2022 年 2 月,谷歌携手 NBA 推出元宇宙^[55]项目 Google Pixel Arena,通过该项目,球迷可以用自己的虚拟化身参加篮球赛事活动,“身临其境”地体验 NBA 季后赛,观看比赛直播。微软提出的“工业元宇宙”解决方案则是基于微软 Azure 云服务^[56],针对不同的使用场景推出了多种解决方案。比如,利用 Azure IoT 对企业生产线、供应链中的设备与传感器实现连接管理,实时采集汇总各类数据信息;利用 Azure Digital Twins 实现人、物、场等的数字孪生;利用 Azure 云服务的机器学习来模拟机器的使用情况,可以让企业对自家的设备进行预测性的维护。此外,微软也表示借助 HoloLens 这样的混合设备能够实现人机交互,从而为一线员工提供在线且直观的指导,让企业实现灵活、高效地开发与运营。

Meta 公司开发的 Horizontal Worlds^[57]是一个类似《我的世界》的沙盒游戏,目前,它已经扩展成一个社交平台,支持用户最多同时和 20 人社交,并逐渐成长为一个由整个社区设计和构建的、不断扩展的虚拟体验宇宙。亚马逊公司则认为,元宇宙离不开云计算,未来将会从自身业务出发,来进军元宇宙,为元宇宙业务场景提供基于 AWS 平台的基础服务。2022 年 3 月,亚马逊^[58]推出了一款在线角色扮演游戏 AWS Cloud Quest,让玩家能够培养云计算技能。在该游戏中,用户需要解决云计算难题和任务,以便在穿越虚拟世界时赚取积分。亚马逊聚焦于技术底层的能力建设,以云为核心,已形成丰富的元宇宙开发工具。

表 2 国际上元宇宙的主要研究组织及研究方向

Table 2 Major international organizations and their research directions of the metaverse

团队组织	商业项目	技术特征	核心技术	适用范围
英伟达	Omniverse Cloud	整合 3D 设计协作和模拟等服务	云计算技术	供艺术家、开发人员和企业团队设计、发布、运营和随时随地体验元宇宙应用
Google	Google Pixel Arena	提供虚拟现实应用服务	3D、AR 技术	用户可用自己的虚拟化身参加篮球赛事活动
微软	微软 Azure 云服务	整合多种计算、数据服务、应用服务、网络服务等	云计算	帮助用户快速开发、部署、管理应用程序
Meta	Horizon Worlds、Meta accounts、Meta profiles	虚拟现实、身份认证	虚拟现实、电子游戏技术、软件技术	元宇宙应用游戏、身份认证系统
亚马逊	AWS Cloud Quest	虚拟化身	虚拟现实、3D、电子游戏	带有元宇宙色彩的游戏

3.2 国内相关研究组织

国内学术界对元宇宙研究也十分热门,多个大学和科研机构都设立了元宇宙研究院和实验室,并做了大量的研究工作,最为著名的是清华大学新闻学院元宇宙文化实验室.国内企业界主要元宇宙研究组织及研究方向如表 3 所示.

百度在 2021 年 12 月 27 日的百度 AI 开发者大会上,发布了其元宇宙产品——希壤^[59],这是一个平行于物理世界的支持沉浸式虚拟空间,该产品打造了一个跨越虚拟与现实、永久续存的多人互动空间.“希壤”将在视觉、听觉、交互 3 大方面实现技术创新突破.从 2021 年 12 月 27 日起,每一个用户都可以创造一个专属的虚拟形象,在个人电脑、手机、可穿戴设备上登录“希壤”,听会、逛街、交流、看展.HTC(宏达电)在 2022 年世界 VR 产业大会上推出全新 Viverse 开放式元宇宙生态系统和平台^[60],展示了 VR 在行业应用层面不断落地的推进价值,以及如何用软硬件和内容有机结合赋能消费用户的工作与生活.字节跳动在 2021 年 9 月收购了 VR 研发公司 PICO^[61],并使其成为字节旗下的 VR 部门.PICO 致力于成为领先的世界级 XR 平台,成就开发者与创作者,共同为全球消费者创造更美好的生活体验.目前 PICO 推出的多款优秀的 VR 头显设备在消费市场颇受欢迎,并有望推动国内 VR 设备的大众化进程.

Cocos 是一家提供数字内容开发一站式解决方案的软件公司^[62],其最为著名的产品就是 Cocos 游戏开发引擎,它有助于降低元宇宙应用门槛,帮助开发者快速开发元宇宙应用.目前,在虚拟数字人场

景,Cocos 已经实现创造虚拟人所需的建模、口型、动捕、渲染、AI 接入 5 大关键技术,帮助开发者创造逼真的 3D 形象.京东推出的灵稀^[63]是一款京东数字藏品平台小程序,其实质是一个 NFT 数字藏品平台.每个数字藏品都有一张独一无二的“数字证书”,应用京东智臻链的区块链技术能力进行存证,具备唯一性、不可篡改性、不可复制性.平台上的所有藏品将全部采用链上发行、链上交易的模式,利用区块链技术助力数字藏品的流转.

此外,近年来,有企业将元宇宙概念应用到气象领域,并取得了一些成果.北京数字冰雹信息技术有限公司率先将元宇宙概念应用于气象灾害检测领域,其开发的智慧气象数字孪生 IOC 系统^[64],支持整合气象监管相关部门现有信息系统的数据资源,深度融合 5G、大数据、云计算、AI、融合通信等前沿技术应用,将信息、技术、设备与气象监管部门需求有机结合,覆盖气象日常监测、气象灾害监测、气象灾害事件等多个业务领域,赋能用户业务应用,实现“智能感知、智能分派、智能处置、智能考评、智能改进”,有效提升跨部门决策和资源协调效率,为气象灾害预报预警领域的数字化转型升级提供了新的典范.

4 元宇宙存在的挑战和机遇

目前,尽管元宇宙正处于风口,学术界和工业界都掀起了研究元宇宙的热潮,通过分析了解到元宇宙具有许多优点,但是也应清醒地认识到元宇宙存在的一些亟待解决的问题,例如该怎样确立元宇宙世界运行的基本框架、如何避免形成元宇宙的高度

表 3 国内元宇宙的主要研究组织及研究方向

Table 3 China's organizations and their research directions of the metaverse

团队组织	商业项目	技术特征	核心技术	适用范围
百度	希壤	元宇宙平台应用	云计算、人工智能、电子游戏技术	提供一个跨越虚拟与现实、永久续存的多人互动平台
HTC 宏达电	Vive Viverse	开源元宇宙平台	软件、虚拟现实技术	支持智能手机、PC、平板和 Vive Flow 眼镜的跨平台用户
字节跳动	PICO 系列 VR 一体机	VR 头显	UI 与人体工程、光学设计与算法、整机系统与低延迟算法、头部追踪与手势识别、眼球追踪与注视点渲染、Haptics 与触觉反馈、3D Sound	计算机外围设备;光通信设备
Cocos	开源引擎框架 Cocos2d-x、游戏加速框架 Cocos Runtime 等数字内容开发一站式解决方案	数字内容开发一站式解决方案		服务了 2D 和 3D 游戏开发、智能座舱、在线教育、XR、数字人、数字文创等领域开发者
京东	灵稀	数字藏品平台小程序		电子商务

垄断、如何维系现实世界和元宇宙虚拟世界之间的正面互动关系、如何保护用户隐私和数据安全等^[65]。与此同时,业内还有不少专家和学者对元宇宙持怀疑态度,认为这是互联网企业在炒作概念,好借此进行融资。因此,需要进一步加强宣传和开发出实际可行的元宇宙产品,为科研生产生活服务。本文列出了元宇宙发展过程中主要存在的一些挑战问题和机遇,如表4所示,希望能为未来元宇宙的研究发展提供一些思路。

5 总结与展望

元宇宙作为一个技术概念,起源于20世纪八九十年代,当时的人们只能在科幻小说中描绘未来的元宇宙世界,可以说元宇宙世界是一个近似于乌托邦式的理想国,在那里,人类可以实现每个人自由而全面的发展,而这是建立在生产力水平高度发达的前提之下的。之后,随着现代信息技术和计算机硬件的飞速发展,借助于多种先进技术,我们能够构建包含一些元宇宙特征的元宇宙应用,并将其运用到特定的行业,推动各行业的数字化、信息化发展进程。然而,我们距离实现真正的元宇宙世界还很遥远,可能需要几代人,甚至几十代人的不懈努力,才能够最终实现元宇宙描绘出的未来高度虚实相融的世界。当前,我们只能勾勒出未来元宇宙世界的一些轮廓,而不能详细描述未来的元宇宙世界。

目前,中国政府已经开始关注元宇宙的发展,并出台一系列政策法规鼓励元宇宙相关产业的发展。2022年1月,上海市经济和信息化委员会召开会议,强调要引导企业加紧研究未来虚拟世界与现实社会

交互的重要平台,被业内称为“我国地方政府对元宇宙相关产业发展的第一次正面表态”。同年1月24日,工业和信息化部表示,要培育一批进军元宇宙、区块链、人工智能等新兴领域的创新型中小企业。2022年2月,杭州市第十三次党代会报告表示,要抓紧元宇宙等未来产业布局。同年3月,北京通州发布《关于加快北京城市副中心元宇宙创新引领发展若干措施的通知》。2022年7月,上海市发布《上海市培育“元宇宙”新赛道行动方案(2022—2025年)》,以及上海市人民政府办公厅印发的《上海市数字经济发展“十四五”规划》指出,政府支持龙头企业探索NFT交易平台建设。同年8月,武汉发布《武汉市促进元宇宙产业创新发展实施方案(2022—2025年)》,同月,《北京城市副中心元宇宙创新发展行动计划(2022—2024年)》发布,首次提出跟踪NFT、聚焦数字藏品等举措。所有的一切表明,元宇宙应用已经在中国市场上全面启动,元宇宙的发展正走上快车道。

本文调研了近年来有关元宇宙的文献,对元宇宙从概念、技术和应用三方面进行了综述。随着国内外对元宇宙及其关键技术的研究逐渐深入,越来越多的科技公司和学者纷纷加入到元宇宙的研究浪潮之中,为元宇宙进一步发展提供可能。可以说,元宇宙正在更加靠近科技舞台的中央。未来元宇宙相关研究应立足于技术发展与实践的基础上不断深入,与更多行业相融合,落地一些实际可行的应用产品,同时还要考虑元宇宙发展过程中所带来的安全与监管、伦理与道德层面的问题,使其良性发展,这样元宇宙必将会对经济社会发展产生深远的影响,推动人类社会进入下一个新的纪元。

表4 元宇宙发展的挑战及可能解决方案

Table 4 Possible solutions to challenges in development of the metaverse

序号	挑战问题	主要内容	解决方案
1	如何明确基本框架	元宇宙是现实经济社会的场景模拟,其中涉及到价值观念、制度设计和法律秩序等一系列基本框架选择问题	元宇宙相关企业、研究部门从社会价值观、制度设计、法律秩序等层面联合研究、综合考量,制定元宇宙运行的基本框架,并根据社会发展需要,适当更新
2	元宇宙高度垄断	元宇宙场景的实现,需要巨大的人力和物力投入,同时又要实现超大规模的连接,因此,元宇宙具有一种内在垄断基因,必须避免元宇宙被少数力量所垄断	政府应出台元宇宙相关反垄断政策法规,推动元宇宙行业公平合理有序地发展
3	虚实世界的关系	如何维系现实世界和元宇宙之间的正面互动关系,也就是用好元宇宙这把双刃剑,谨防人们沉浸在元宇宙场景中不能自拔,要发挥元宇宙的积极作用	元宇宙行业可借鉴电子游戏领域的防沉迷机制,谨防人们沉浸在元宇宙场景中不能自拔。同时,还需要加大宣传力度,引导社会公众对元宇宙的理解,充分发挥元宇宙的积极作用
4	隐私和数据安全	如何保护隐私和数据安全,元宇宙的发展需要搜集人们更多的个人信息,保护个人隐私和数据安全将是一个非常大的挑战	政府可出台元宇宙行业个人隐私保护法。同时,元宇宙行业可借助区块链等网安技术保障信息安全

参考文献

References

- [1] Wikipedia Encyclopedia. Metaverse [EB/OL]. [2022-11-02]. <https://encyclopedia.thefreedictionary.com/metaverse>
- [2] 微软发布元宇宙战略, 让你了解它的愿景 [EB/OL]. [2022-12-05]. <https://new.qq.com/rain/a/20220526A0CSBJ00>
- [3] Amazon Web Services. 亚马逊云科技助你探索元宇宙 [EB/OL]. [2022-11-01]. <https://aws.amazon.com/cn/campaigns/metaverse/>
- [4] 赵颖. 10 个问题带你了解什么是元宇宙 [EB/OL]. [2022-06-02]. https://www.sohu.com/a/553522150_121292768
- [5] 百度百科. 元宇宙 [EB/OL]. [2022-10-10]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%85%83%E5%AE%87%E5%AE%99/58292530>
- [6] 黄泽正. 关于腾讯元宇宙的 10 个事实和 7 个猜想 [EB/OL]. [2022-02-24]. <http://yyz.cn/forum.php?mod=viewthread&tid=1811>
- [7] 元宇宙界. 德勤-元宇宙行业深度研究报告: 愿景、技术和应对 [EB/OL]. [2022-03-11]. <https://www.yuanyuzhoujie.com/2022/0311/3929.shtml>
- [8] 中国网. 北京大学学者发布元宇宙特征与属性 START 图谱 [EB/OL]. [2021-11-19]. https://share.gmw.cn/it/2021-11/19/content_35323118.htm
- [9] 新华网. 什么是元宇宙? 为何要关注它? ——解码元宇宙 [EB/OL]. [2021-12-08]. http://bj.news.cn/2021-11/20/c_1128082017.htm
- [10] 王文喜, 周芳, 万月亮, 等. 元宇宙技术综述 [J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 744-756
WANG Wenxi, ZHOU Fang, WAN Yueliang, et al. A survey of metaverse technology [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 744-756
- [11] 高希夷. 云网一体化数据中心 5G 技术的应用 [J]. 现代传输, 2022(5): 45-48
GAO Xiyi. Application of 5G technology in cloud network integrated data center [J]. Modern Transmission, 2022(5): 45-48
- [12] Park H, Lim Y. Deep reinforcement learning based resource allocation with radio remote head grouping and vehicle clustering in 5G vehicular networks [J]. Electronics, 2021, 10(23): 3015
- [13] Kottursamy K, Khan A U R, Sadayappillai B, et al. Optimized D-RAN aware data retrieval for 5G information centric networks [J]. Wireless Personal Communications, 2022, 124(2): 1011-1032
- [14] Kulkarni A V, Menon R, Kulkarni P H. Fractional sequential likelihood ascent search detector for interference cancelation in massive MIMO systems in 5G technology [J]. International Journal of Electronics, 2021, 108(12): 2058-2077
- [15] Jeyakumar P, Ramesh A, Srinitha S, et al. Wideband hybrid precoding techniques for THz massive MIMO in 6G indoor network deployment [J]. Telecommunication Systems, 2022, 79(1): 71-82
- [16] Zhang Q X, Ma W M, Feng Z Y, et al. Backhaul-capacity-aware interference mitigation framework in 6G cellular Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(12): 10071-10084
- [17] Lin K, Li Y H, Zhang Q, et al. AI-driven collaborative resource allocation for task execution in 6G-enabled massive IoT [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5264-5273
- [18] 方巍, 文学志, 潘吴斌, 等. 云计算: 概念、技术及应用研究综述 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2012, 4(4): 351-361
FANG Wei, WEN Xuezhong, PAN Wubin, et al. Cloud computing: conceptions, key technologies and application [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 4(4): 351-361
- [19] Sarosh A. Machine learning based hybrid intrusion detection for virtualized infrastructures in cloud computing environments [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2089(1): 012072
- [20] Chraïbi A, Alla S B, Ezzati A. Makespan optimisation in cloudlet scheduling with improved DQN algorithm in cloud computing [J]. Scientific Programming, 2021, 2021: 1-11
- [21] Smara M, Aliouat M, Harous S, et al. Robustness improvement of component-based cloud computing systems [J]. The Journal of Supercomputing, 2022, 78(4): 4977-5009
- [22] Muteeh A, Sardaraz M, Tahir M. MrLBA: multi-resource load balancing algorithm for cloud computing using ant colony optimization [J]. Cluster Computing, 2021, 24(4): 3135-3145
- [23] Almasri S, Jarrah M, Al-Duwairi B. Multi-objective optimization of task assignment in distributed mobile edge computing [J]. Journal of Reliable Intelligent Environments, 2022, 8(1): 21-33
- [24] Chen X, Xu H B, Zhang G P, et al. Unsupervised deep learning for binary offloading in mobile edge computation network [J]. Wireless Personal Communications, 2022, 124(2): 1841-1860
- [25] Rodrigues T K, Liu J J, Kato N. Application of cybertwin for offloading in mobile multiaccess edge computing for 6G networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(22): 16231-16242
- [26] 郑诚慧. 元宇宙关键技术及与数字孪生的异同 [J]. 网络安全技术与应用, 2022(9): 124-126
ZHENG Chenghui. Meta-key technologies of the universe and their similarities and differences with digital twins [J]. Network Security Technology & Application, 2022(9): 124-126
- [27] Gao W F, Zhao Z W, Min G Y, et al. Resource allocation for latency-aware federated learning in industrial internet of things [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(12): 8505-8513
- [28] Rodriguez-Pabon C, Riva G, Zerbini C, et al. An adaptive sampling period approach for management of IoT energy consumption: case study approach [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(4): 1472. DOI: 10.3390/s22041472

- [29] Karthick S, Gomathi N. Sparrow search algorithm-based resource management in internet of things (IoT) [J]. EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2021, 9 (37):169915
- [30] Jiang W H, Li S, Zhao Y C, et al. Fine-grained hand gesture recognition based on active acoustic signal for VR systems [J]. CCF Transactions on Pervasive Computing and Interaction, 2020, 2(4):329-339
- [31] Fu L, Zhu J, Li W L, et al. Tunnel vision optimization method for VR flood scenes based on Gaussian blur [J]. International Journal of Digital Earth, 2021, 14 (7): 821-835
- [32] Marchesi G, Eichhorn C, Plecher D A, et al. EnvSLAM: combining SLAM systems and neural networks to improve the environment fusion in AR applications [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10 (11): 772. DOI:10.3390/ijgi10110772
- [33] 百度百科. WebRTC [EB/OL]. [2022-07-17]. [https://baike.baidu.com/item/WebRTC/5522744?fr=aladdin#reference-\[6\]-5916097-wrap](https://baike.baidu.com/item/WebRTC/5522744?fr=aladdin#reference-[6]-5916097-wrap)
- [34] 狼大叔. 跑跑狼、鹅鹅鸭,谁才是次世代的狼人杀 [EB/OL]. [2022-11-26]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/586889472>
- [35] 旭焱. 元宇宙的八大支撑技术 [EB/OL]. [2022-08-24]. <https://book.douban.com/review/14599536/>
- [36] 百度百科. DLSS [EB/OL]. [2022-10-12]. <https://baike.baidu.com/item/DLSS/60106507?fr=aladdin>
- [37] Almahasneh M, Paiement A, Xie X H, et al. MLMT-CNN for object detection and segmentation in multi-layer and multi-spectral images [J]. Machine Vision and Applications, 2022, 33 (1): 9. DOI: 10.1007/s00138-021-01261-y
- [38] Haridas A V, Marimuthu R, Sivakumar V G, et al. Taylor-DBN: a new framework for speech recognition systems [J]. International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, 2021, 19(2):2050071
- [39] Tajbakhsh M S, Emamgholizadeh H, Solouk V, et al. Multi-agent celebrity recommender system (MACeRS): Twitter use case [J]. Social Network Analysis and Mining, 2022, 12 (1): 11. DOI: 10.1007/s13278-021-00845-w
- [40] Shi X J, Chen Z R, Wang H, et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation nowcasting [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2015:802-810
- [41] Wang Z J, Zhao J H, Zhang R, et al. UATNet: U-shape attention-based transformer net for meteorological satellite cloud recognition [J]. Remote Sensing, 2021, 14(1):104. DOI:10.3390/rs14010104
- [42] Lee L H, Braud T, Zhou P, et al. All one needs to know about metaverse: a complete survey on technological singularity, virtual ecosystem, and research agenda [J]. arXiv e-print, 2021, arXiv:2110.05352
- [43] 郭全中,魏滢欣,冷一鸣. 元宇宙发展综述 [J]. 传媒, 2022(14):9-11
- [44] Prasanna D S J D, Aravindhar D D J, Sivasankar D P. Block chain based grey hole detection Q learning based CDS environment in cloud-MANET [J]. Webology, 2021, 18(SI01):88-106
- [45] Bandara E, Shetty S, Mukkamala R, et al. Casper: a blockchain-based system for efficient and secure customer credential verification [J]. Journal of Banking and Financial Technology, 2022, 6(1):43-62
- [46] Rehman M H U, Dirir A M, Salah K, et al. TrustFed: a framework for fair and trustworthy cross-device federated learning in IIoT [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(12):8485-8494
- [47] 于勇,范胜廷,彭关伟,等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨 [J]. 航空制造技术, 2017, 60(7):41-45
- [48] YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7):41-45
- [48] 邹海林,员安然,郭金兰,等. 澳门海岸带数字孪生系统构建设想 [J]. 中国水利, 2022(20):30-33
- [49] ZOU Hailin, YUAN Anran, Guo Jinlan, et al. Ideas and application of digital twin system in the coastal zone of Macao [J]. China Water Resources, 2022(20):30-33
- [49] 黄艳,喻杉,罗斌,等. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索 [J]. 水利学报, 2022, 53(3):253-269
- [50] HUANG Yan, YU Shan, LUO Bin, et al. Development of the digital twin Changjiang River with the pilot system of joint and intelligent regulation of water projects for flood management [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3):253-269
- [50] 李强. 基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警系统分析 [J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(5):476-485
- [51] LI Qiang. Analysis of the evaluation and pre-warning system of the urban flood disaster based on the digital twin technology [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(5):476-485
- [51] 徐瑞,叶芳毅. 基于数字孪生技术的三维可视化水利安全监测系统 [J]. 水利水电快报, 2022, 43(1):87-91
- [52] XU Rui, YE Fangyi. Three-dimensional visual water conservancy safety monitoring system based on digital twin technology [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2022, 43(1):87-91
- [52] Chiu C C, Tripathi A, Chou K, et al. Speech recognition for medical conversations [C]//Interspeech 2018. ISCA, 2018. DOI:10.21437/Interspeech.2018-40
- [53] 数字菁英. 清华元宇宙报告 3.0(2022年) [EB/OL]. [2022-11-15]. <https://www.digitalelite.cn/h-nd-5397.html>
- [54] 新浪VR. 英伟达推出 Omniverse Cloud 服务,用于构建和运营工业元宇宙应用 [EB/OL]. [2022-09-21]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1744548607885684297&wfr=spider&for=pc>
- [55] 南方都市报. 谷歌携手 NBA 推元宇宙项目,球迷可用虚拟化身参加篮球活动 [EB/OL]. [2022-04-19]. https://www.sohu.com/a/539345046_161795
- [56] 热点科技. 微软入华 30 载:“工业元宇宙”解决方案亮相市场 [EB/OL]. [2022-11-06]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1748762100807407716&wfr=>

- spider&for=pc
- [57] 爱范儿.Meta 开放虚拟世界 Horizon Worlds, 一起冥想、乘船、大逃杀 [EB/OL]. [2021-12-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id = 1718762466893462423&wfr = spider&for = pc>
- [58] 品牌策划圈.亚马逊欲进军元宇宙, 开启“征战模式” [EB/OL]. [2022-04-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id = 1730812339572101411&wfr = spider&for = pc>
- [59] 北京日报客户端.首个国产元宇宙 APP 百度“希壤”开放内测 [EB/OL]. [2021-12-21]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id = 1719763890762983247&wfr = spider&for = pc>
- [60] HTC Viverse 亮相 2022 世界 VR 产业大会, 斩获 VR/AR 创新金奖 [EB/OL]. [2021-11-18]. <https://www.weiot.net/article-371038-1.html>
- [61] 驱动中国.PICO 4 系列正式发布, 有望开启国内 VR 大众化之路 [EB/OL]. [2022-09-28]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id = 1745207166380004325&wfr = spider&for = pc>
- [62] 中国网财经.不只是游戏引擎, Cocos 近日完成 5000 万美元 B 轮融资 [EB/OL]. [2022-04-12]. <https://finance.china.com.cn/roll/20220412/5783895.shtml>
- [63] 36 氪.京东正式上线灵稀数字藏品交易平台, 首款数字藏品发售 [EB/OL]. [2021-12-18]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id = 1719466528716812950&wfr = spider&for = pc>
- [64] 数字冰雹大数据可视化.智慧气象数字孪生 IOC 系统 [EB/OL]. [2022-04-12]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/425983792>
- [65] 中新网.社科院专家:元宇宙是双刃剑, 将带来五大巨变 [EB/OL]. [2021-11-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s? id = 1716369079652499780&wfr = spider&for = pc>

Metaverse: conceptions, key technologies and applications

FANG Wei^{1,2,3} FU Yuxiang¹

1 School of Computer Science/Engineering Research Center of Digital Forensics Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3 Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract The rapid development of network technology, human-computer interaction and artificial intelligence has given birth to the metaverse and further promoted the digital transformation of all aspects of people's life. The concept of metaverse emerged in 2021, and has attracted extensive attention from industry, academia, media and the public. This paper attempts to deeply analyze the metaverse from the perspective of technology and application. First, the concept and connotation of the metaverse are elaborated from the definition, origin & development, characteristics and key technologies (network and computing, Internet of Things, human-computer interaction, electronic game, block chain, digital twin, etc.). Then, the enterprises and application examples involved in the metaverse are discussed. Finally, the existing challenges and opportunities in the development of the metaverse are analyzed, and the future researches and applications are prospected. Through the meta-analysis of the current development status and research trend of the metaverse and the scientific evaluation of the potential application of the metaverse, we can provide useful reference for the researchers of the metaverse.

Key words metaverse; digital twin; artificial intelligence; virtual reality; edge computing; 6G; block chain