

# 空天元宇宙的关键技术及应用研究

王 众<sup>1,2,3</sup>, 孙胜利<sup>1,3\*</sup>, 陈 锐<sup>1,2,3</sup>, 马一骏<sup>1,2,3</sup>, 徐文君<sup>1,3</sup>, 张亚峰<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 通过充分的调研和对比总结, 梳理了 20 世纪 60 年代以来, 元宇宙概念以及航天领域相关技术的发展趋势和代表性工作, 指出多星组网以及数字化、虚拟化成为未来空天科技发展的重要方向。针对这一发展态势提出了“空天元宇宙”的概念, 围绕这一概念对其数理基础进行了分析, 提出航天数字孪生、广域超高速智能感知等构建空天元宇宙所需的关键技术并对其实现途径进行了阐述; 进一步地, 结合航天科技蓬勃发展的蓝图, 预判了可能首先获得应用的场景, 分析了构建空天元宇宙的现有困难, 并提出了解决建议, 为空天技术的发展提供了新思路, 最后对空天元宇宙未来的发展进行了展望。

**关键词:** 空天元宇宙; 虚拟化; 多星组网; 航天数字孪生; 全光感知

**中图分类号:** V411.8; F49 **文献标识码:** A

## Research on the Key Technologies and Applications of Aerospace Metaverse

WANG Zhong<sup>1,2,3</sup>, SUN Shengli<sup>1,3\*</sup>, CHEN Rui<sup>1,2,3</sup>, MA Yijun<sup>1,2,3</sup>, XU Wenjun<sup>1,3</sup>, ZHANG Yafeng<sup>1,3</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Intelligent Infrared Sensing, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Through sufficient investigation and summary, the development trend and representative work of Metaverse and related technologies in the aerospace field since the 1960s have been sorted out, and it is pointed out that multi-satellite networking, digitalization and virtualization will become important development trends of aerospace science and technology. Hence, a new concept called “Aerospace Metaverse” has been proposed. Based on this concept, the fundamentals of mathematics and physics have been analyzed. Necessary technologies to build Aerospace Metaverse such as digital twins of aerospace and wide domain ultra high speed intelligent perception have been proposed, and their implementation approaches are elaborated. Furthermore, combining with the vigorous development of aerospace technology, scenarios that can be first put into use have been predicted. Several existing difficulties in building Aerospace Metaverse and corresponding solutions have been proposed, providing new ideas for the development of aerospace technology. Finally, an outlook has been made on the future development of Aerospace Metaverse

**Key words:** Aerospace Metaverse, Virtualization, Multi-satellite networking, Digital twins of aerospace, All-optical perception

**PACS:**

## 0 引 言

随着科技的进步和认知水平的发展, 地面观测已经不能满足人们对探索宇宙的渴望, 1957 年前苏联利用 R7 运载火箭将 Sputnik 卫星送入地球轨道,

标志着人类对宇宙的探索进入新的纪元, 之后, 空间和航天科技发展之迅猛出乎意料。2022 年世界航天发射次数和发射质量均创新高, 2022 年全球共实施 186 次发射任务, 完全成功率 95.7%, 送入轨道的有效载荷达到 2497 个; 人们在地球环境监测<sup>[1]</sup>、

作者简介 (Biography): 王众 (1997-), 男, 博士研究生, 研究方向为混沌系统的智能预测, wangzhong19@mails.ucas.ac.cn; 孙胜利 (1970-), 中国科学院院士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为红外遥感探测, Palm\_sun@mail.sitp.ac.cn。

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: Palm\_sun@mail.sitp.ac.cn

地外行星探索<sup>[2]</sup>、引力波探测<sup>[3]</sup>、暗物质探测<sup>[4]</sup>等诸多领域取得了重大突破。日益增长的空天领域需求与先进的社会生产强耦合,成为推动航天科技迅猛发展的底层逻辑。

随着航天技术、虚拟现实、人工智能等领域的迅速发展,存在一个将这些技术融合以创新航天应用的需求。“空天元宇宙”正是这种融合的产物,旨在探索和利用这些技术在航天领域的新应用。

一方面,元宇宙概念原本多用于描述虚拟世界的构建和交互,而将其扩展到空天领域,可以探索元宇宙技术在更广泛、更高技术层面的应用。

另一方面,航天领域面临的挑战复杂多样,包括远程操作、环境模拟、数据处理等。空天元宇宙提供了一个新的平台和方法,以应对这些挑战。

本文首先对未来空天技术发展的方向和趋势进行了分析,提出了“空天元宇宙”这一概念;接着对空天元宇宙的数理基础和核心技术进行了综述;然后设想了空天元宇宙的主要应用场景,最后进行了总结和展望。

## 1 空天元宇宙的概念和发展概况

当前空间技术已经由单星单器时代迈向多星多器时代,一星多用、多星组网、分布协同成为趋势;同时随着当前人工智能、虚拟现实以及超级计算机等技术的发展,空间技术也正向着虚拟化、数字化的方向发展。本章节将对空天元宇宙概念和相关技术的发展概况进行展开叙述。

### 1.1 空天元宇宙的概念

空天元宇宙,是各节点(如科研机构、企业、个人)以数字身份参与科研、生产、航天、军事、教育等活动的去中心化的数字空间,它与真实宇宙虚实共生、迭代演化。具体来说,是借助物联网、区块链、超高速网络与计算、人机交互等技术,将物理世界中人类已掌握的宇宙运行规律以及所进行的航空航天有关的各项活动映射到数字空间,所构建的空天技术数字孪生平台,可以在其中进行大规模空间实验、航天器设计制造、卫星监测与维护、航天模拟训练、全域联合军事行动和航天文化教育等活动,同时元宇宙会作用于物理世界,实现虚实交互。

空天元宇宙在继承了沉浸式、可持续性、去中心化和社交互动等元宇宙自身属性的基础上,将其概念进一步延伸到航空航天领域,涉及航天技术、遥感技术、高性能计算等,相比其他类型的元宇宙,具有技术高度集成、航天应用导向、多学科融合、创

新科研协作模式等重要特点。另外,去中心化仍是其重要的属性,它破除了信息不对称,实现多个主体之间的协同信任与一致行动,保证隐私、安全和自治,避免单一实体垄断控制等问题。现阶段,各国的航天工业一般由政府主导,科研单位主要参与,这是中心化的体现,与空天元宇宙的去中心化宗旨相违背。然而,近年民用航天的兴起,证明企业在航天工程中发挥重要作用。航空航天已由国家主导逐渐向国家和企业共同主导转变。许多企业通过研发新技术和探索新方法,为航天工程带来了创新,例如,重复使用火箭技术的开发,大幅降低了航天发射成本;企业在探索商业航天的新模式方面也发挥着重要作用,他们不仅提供卫星发射服务,还涉足卫星通信、地面监测、太空旅游等多个领域,极大地丰富了航天产业的商业模式。这不仅有助于为航天事业提供更丰富的资金来源,还有助于航天科技的普及和航天文化的传播。大胆设想,未来的空天事业将由国家、企业和个人共同参与,企业和个人将成为中坚力量,与国有科研机构共同组成空天元宇宙中数以亿计的节点。未来的空天元宇宙是去中心化的,不再属于某个国家或者企业,而必须通过一个开源共享协议来共同维护,协议和规则的制定权、解释权不独属于任何一方,元宇宙的存续不受任何国家或企业的外力影响。任一空天元宇宙的节点既是服务端,也是客户端,都有同等权限参与区块链的记录和验证,这有助于促进用户创建内容,提高创新性和协作性。

数理基础方面,空天元宇宙的信任和安全建立在区块链的去中心化结构和密码学逻辑上,其建立依赖于网络理论和图论、通信原理以及加密算法等理论,它们共同构建了空天元宇宙的价值系统和身份系统;空天元宇宙的虚实映射建立在真实世界的物理逻辑之上,对于特定场景,虚拟世界中的孪生副本必须严格遵守现实世界的物理规律,如计算流体动力学,以保证空天元宇宙中科学实验、生产制造和军事活动的合理、可行和安全。空天元宇宙的数理基础将在文章第二章进行详细论述。

技术方面,空天元宇宙的虚实映射基于航天数字孪生技术和空天物联网实现,虚实交互基于以脑机接口为代表的人机交互技术实现,海量数据的处理基于广域超高速智能感知技术实现,数据的传输基于天地一体化高速网络的建设。这些技术是构建空天元宇宙硬件系统的关键,将在文章第三章节

进行详细论述。图1描绘了空天元宇宙的主要组成部分。其中,硬件系统是物理基础,包括以上述技术为核心构建的数据中心、通信卫星、空间站、地面基站、传感器等,价值系统处理交易、资源分配和激励机制,身份系统负责管理用户和设备的身份信息,包括科研人员、开发者、爱好者以及设备之间的身份验证、授权和访问控制。

硬件系统为价值系统和身份系统提供必要的物理平台和技术支持;价值系统通过激励机制和资源分配,促进硬件系统的发展和优化,同时依赖身份系统来保障交易的安全和有效性;身份系统确保了用户和设备的身份安全,为价值交换和硬件系统的有效运营提供了信任基础。综上所述,这三个系统在空天元宇宙中共同作用,形成了一个互联互通、高效安全的空天生态系统。

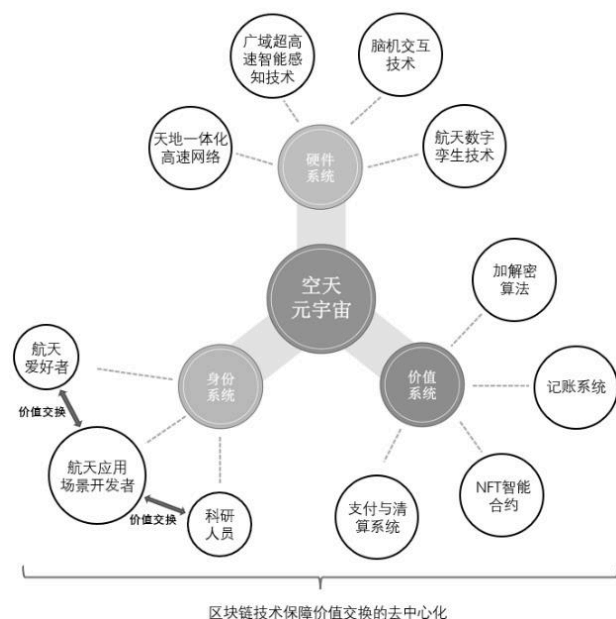


图1 空天元宇宙的主要组成部分

Fig. 1 The main components of Aerospace Metaverse

## 1.2 空天元宇宙的发展概况

Neal Stephenson 在科幻小说《雪崩》中提出了“元宇宙”这一概念<sup>[5]</sup>,近几十年科技的进步让元宇宙从科幻走向现实,人工智能、增强现实等技术的发展大大提高了人们在虚拟世界中的沉浸感。2021年元宇宙平台公司 Roblox 上市,Facebook 宣布进军元宇宙并改名为 Meta,引爆了元宇宙这一概念,2021年也被称为元宇宙元年。

数字化的浪潮同样对航天科技产生了深刻的影响,据美国《信号》杂志 2022 年 2 月报道,美国已

制定政策发展以数字工程为基础的太空军体系;国内在近年来也开始了星地孪生平台的建设,其利用数字孪生和智能技术,以真实数据为驱动,构建与现实世界并行的数字全景映像。空天技术数字化、信息化、智能化成为发展趋势。

空天元宇宙是在元宇宙概念的基础上,结合空天科技的发展而形成的新概念。它不仅包含了元宇宙的虚拟性和沉浸感,还融入了空天科技的关键元素,如空间通信和高性能计算,这种结合为空天研发、航天器控制、甚至是太空探索提供了新的视角和工具。

空天元宇宙的实现依赖于高性能计算和空间通信技术的融合。高性能计算提供了处理大量数据的能力,而空间通信技术则保证了数据的高速、可靠传输。这两项技术的结合,为空天元宇宙中的数据处理和信息传递提供了坚实的基础。例如,通过高性能计算处理的数据可以通过空间通信技术快速传输到地面控制中心,实现对航天器的实时控制。

### 1.2.2 高性能计算发展概况

2020 年全球算力总规模达到 429EFlops ( $429 \times 10^{18}$  次浮点运算/秒),增速达到 39%,据 IDC 预估到 2025 年全球算力总体规模将达到 3300EFlops,但相比于构建空天元宇宙所需的算力仍然是不足的。基于电子的经典计算已经遇到了摩尔定律的瓶颈,光计算和量子计算将是解决这一算力困境的有效途径。

光计算技术在上世纪五六十年代就已经兴起,早期光计算技术是基于空间光计算方法而构建的,最典型的光计算技术是利用透镜的傅里叶变换性质实现的光学相关器,其通过在频谱平面的光学相乘操作,在 4-f 系统的输出平面实现了目标模式和空间滤波器的空间脉冲响应函数的卷积,进而可以实现并行逻辑运算、超短光脉冲整形等操作<sup>[6]</sup>。另外一个典型应用是基于空间光调制器的光学向量-矩阵乘法器,由 Goodman 在 1978 年提出,其原理是将携带有光源信息的光束输入到信息处理部分,信息处理部分将输入的信息与预置在内的信息相乘,通过改变预置信息来改变输出结果<sup>[7]</sup>。2017 年 Shen Y 团队构建了一种基于硅基马赫-曾德干涉仪光开关阵列(MZI)的全光卷积架构,通过在这种纳米光子芯片上的深度学习编程实现了元音识别<sup>[8]</sup>;2018 年 UCLA 的 Ozcan. A 团队利用 5 层衍射神经网络



络完成了手写数字识别与时尚物品分类<sup>[9]</sup>;2019年德国明斯特大学 Feldmann 团队提出的基于相变材料加级联微环结构的全光学突触神经网络芯片,可实现简单的英文字母识别<sup>[10]</sup>。图2按时间概括了光计算的发展历程。

近年来国内外均加快了在量子计算领域的布局。值得阐明的是,量子计算的信息单位是量子比特,与量子计算相对应的是经典计算,本文所述的光计算是经典计算范畴内的,其信息单位是经典比特。我国在传统电子芯片方面的发展滞后于欧美日韩等国家,目前仅能实现 14nm 芯片的量产,由于光刻机的限制难以实现进一步突破。但是我国在量子计算领域的发展处于世界前列。2017年世界首台光量子计算原型机在中国诞生,纠缠数目达到 10 个,2019 年达到 12 个<sup>[19]</sup>;2020 年 12 月,潘建伟团队成功研制 76 个光子的量子计算原型机“九章”,处理高斯玻色取样的速度比当时最快的超级计算机“富岳”快 1014 倍;2021 年 10 月,113 个光子 144 模式的量子计算原型机“九章 2 号”处理高斯玻色取样的速度比当时最快的超算“富岳”快 1024 倍,标志着我国实现了量子计算优越性<sup>[20]</sup>;2021 年 10 月,66 比

特可编程超导量子计算机“祖冲之二号”,处理量子随机线路取样问题的速度比当时全球最快的超算“富岳”快 7 个数量级,计算复杂度比谷歌的超导量子计算原型机“悬铃木”高一百万倍<sup>[21]</sup>;2021 年 11 月,IBM 推出 127 个量子比特的超导量子芯片“Eagle”<sup>[22]</sup>;2022 年 11 月,IBM 推出 433 个量子比特的 Osprey 超导量子芯片<sup>[23]</sup>。

### 1.2.3 空间通信发展概况

空天元宇宙的建立离不开超高速通信网络。低轨卫星互联网具有低时延、高通量、全球覆盖、应急响应能力强等优点<sup>[24]</sup>,所以国内外都十分重视多星组网技术的发展。空间技术正在由单星单器时代迈向多星多器时代。

中国《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015 年-2025 年)》中指出要通过跨系列、跨星座卫星和数据资源组合应用、多中心协同服务的方式,提供多类型、高质量、稳定可靠、规模化的空间信息综合服务能力,支撑各行业的综合应用<sup>[25]</sup>;我国通信卫星星座虽然起步晚,但发展后势强劲。主要包括虹云工程、行云工程、鸿雁工程等。中国航天科工集团的“虹云”工程,计划发射 156 颗低轨卫星,构

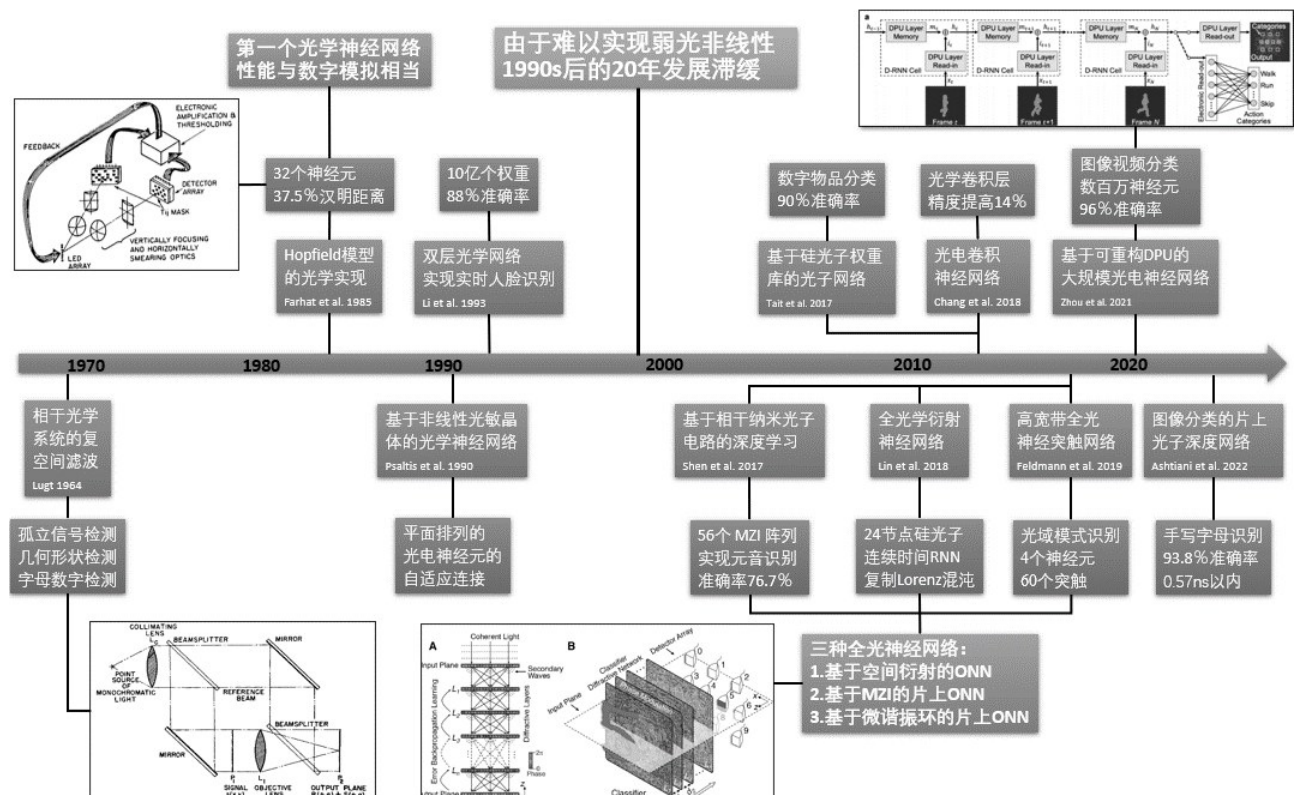


图2 光计算发展历程<sup>[8-18]</sup>

Fig. 2 Development history of optical computing

建星载宽带全球移动互联网络,实现无差别的全球覆盖。2018年12月,“虹云”工程首颗技术验证星成功发射,并且首次将毫米波相控阵技术应用于低轨宽带通信卫星<sup>[26]</sup>。航天科工的“行云工程”,计划发射80颗低轨卫星,构建低轨窄带卫星通信系统,可为用户提供数据采集、信息实时传输、数据深度挖掘等综合物联网信息服务。2020年5月,“行云工程” $\alpha$ 阶段双星成功发射入轨并圆满完成各项在轨测试,成功开展了低轨卫星星间激光通信试验,多项天基物联网核心技术得到有效验证<sup>[27]</sup>。中国航天科技集团的“鸿雁”低轨移动通信及宽带互联网星座,计划发射324颗低轨卫星,具有全天候、全时段及在复杂地形条件下的实时双向通信能力,可为用户提供全球实时数据通信和综合信息服务,首颗试验卫星于2018年12月成功发射<sup>[28]</sup>。银河航天提出的“银河Galaxy”卫星星座是国内规模最大的卫星星座计划,计划到2025年前发射约1,000颗卫星,首颗试验星已于2020年1月发射成功,成为我国首颗通信能力达10Gbps的低轨宽带通信卫星<sup>[29]</sup>。

国际上,规模较大的星座建设计划包括美国Starlink星链计划、Kuiper星座、英国OneWeb星座和加拿大Telesat星座等。Starlink计划在2018年推出,计划在2024年之前在太空搭建由约1.2万颗卫星组成的Starlink网络提供高速互联网服务<sup>[30]</sup>,截至2023年2月1日,Starlink卫星总计升空数量3822颗。2020年,美国Amazon公司的“Kuiper”星座获得美国联邦通信委员会FCC审批,将部署由约3200颗卫星组网的互联网星座<sup>[31]</sup>;英国OneWeb公司的卫星系统,使用Ku-Ka波段,为政府和企业提供商业通信服务<sup>[31]</sup>。截至2022年12月,OneWeb公司累计发射超过450颗卫星,其计划是在其第一代星座中共部署648颗卫星。其他国家如加拿大、俄罗斯、韩

国等也在着手开展通信星座的建设,其主要参数如表1所示。

除目前主流的无线电通信之外,空间激光通信和空间量子通信也是各国通信建设的重要任务。

相比无线电通信,空间激光通信具有更大吞吐、更低延迟等优点,能够满足空天元宇宙的庞大数据量交换需求,缓解通信频率资源日趋枯竭的现状。2001年欧洲航天局完成了史上第一次卫星间的光通信,地球同步轨道卫星Artemis与低轨地球观测卫星SPOT4建立起了长度40000公里的光通信链路,数据传输率达到50Mbps<sup>[34]</sup>;2013年NASA发射的月球大气与土壤环境探测卫星(Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE)上搭载的激光通信设备实现了622Mbps的月地数据传输<sup>[35]</sup>;2021年NASA研制的激光通信中继验证系统(Laser Communications Relay Demonstration, LCRD)成为第一个应用到载人飞船上的实用性光通信系统,其光链路的上传速度能够达到1.2G/s<sup>[36]</sup>;2022年后“Starlink”发射的卫星均配置激光星间链路(Laser Inter-Satellite Links, LISLs)<sup>[37]</sup>。激光星间链路的开通对于实现全球无人区的覆盖至关重要。Starlink卫星地面站不再需要与用户终端位于同一颗卫星的覆盖范围内。这种链路允许将地面站的数量减至最少,并将覆盖范围扩展到没有地面站的偏远地区。

量子通信建立在量子不可克隆性基础上,在理论上绝对安全。我国在该领域处于世界领先地位。2016年,我国用于量子加密通信的“墨子号”卫星升空;2017年,“京沪干线”广域量子通信骨干网络工程建成开通并与“墨子号”成功对接,其总长超过2000公里,成为世界上最远距离的基于可信中继方案的量子安全密钥分发干线;2021年,我国成功实

表 1 国外主要通信星座及其参数<sup>[32, 33]</sup>

Table 1 Main communication satellite constellations abroad and their parameters

Nation	Name	Number of satellites	Comple-tion year	Orbital height/km	Frequency band
US	Starlink	11927	2027	1130	Ku, Ka, V
US	Iridium Next	75	2019	780	Ka
US	Kuiper	3236	2029	590/610/630	Ka
US	O3b	42	-	8062/8072	Ka
UK	OneWeb	2468	2027	1200	Ku, Ka
Canada	Telesat	298	2023	1248/1000	Ka
Russia	Sphere	388	2028	750/8070/ 35786	-

现了跨越4600公里的星地一体大范围、多用户量子密钥分发,构建了世界上首个集成700多条地面光纤量子密钥分发(QKD)链路和两个卫星对地自由空间高速QKD链路的广域量子通信网络<sup>[38]</sup>;2022年5月,中国墨子号卫星实现1200公里地表量子态传输新纪录<sup>[39]</sup>。量子通信的星地一体密钥分发具有大范围、多用户的特点,与空天元宇宙高通量数据传输的特点相契合。

## 2 空天元宇宙的数理基础及其应用

数理问题是设计一个装置、实现一种功能、打造一个系统、认识一个世界的理论支撑,对空天元宇宙而言亦是如此。空天元宇宙中的数理基础是多学科的,其中较为关键的包括:计算流体力学、加密算法、图论、量子信息学和控制理论。本章节将对上述数理基础展开叙述。

### 2.1 计算流体力学

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是一种利用数值分析和数据结构来分析和解决涉及流体流动的问题的分支<sup>[40]</sup>。在空天元宇宙的背景下,CFD成为一个不可或缺的工具,用于模拟和优化航天器在空间环境中的行为,包括其在地球大气层内外的动力学和热力学特性。

#### 2.1.1 计算流体力学的基本原理

CFD的核心是纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations),这是一组描述流体流动的非线性偏微分方程。这些方程结合了质量守恒、动量守恒和能量守恒的原理。在空天元宇宙的应用中,这些方程被用来预测航天器在不同速度和环境条件下的流体动力行为。通常会遇到可压缩流体和不可压缩流体两种情形,具体使用哪种取决于流体的速度和环境条件:

对于不可压缩、牛顿流体,方程可以表示为<sup>[41]</sup>:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

以及连续性方程(表示质量守恒):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

当流体速度远低于声速时,通常可以将流体视为不可压缩的。在这种情况下,流体的密度被认为是恒定的。例如,在低速航天器设计、轨道机动分析、以及某些热力学问题中,流体可以近似为不可压缩流体。这适用于大多数低速、低空的航天应用。

对于可压缩流体,方程可表示为<sup>[41]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f}$$

以及连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

在高速流动情况下,特别是当流体速度接近或超过声速时,流体的可压缩性变得重要。在这种情况下,流体密度会随着压力和温度的变化而变化。这在高速飞行器(如高超音速飞行器)、重返大气层的航天器、以及高空大气动力学分析中尤为重要。

#### 2.1.2 CFD在空天元宇宙的应用

CFD可以使空天元宇宙成为航天工程师强有力的设计工具和研发平台。

在航天器设计优化方面,利用CFD模拟航天器在大气层内外的空气动力学特性,帮助设计师优化其形状以减少阻力和热负荷。

在轨道机动分析方面,通过模拟不同轨道机动对航天器的影响,CFD帮助工程师优化燃料使用和轨道调整策略。

在热保护系统设计方面,CFD用于分析和设计航天器的热保护系统,确保在重返大气层或在极端空间环境中的安全运行。

在推进系统设计方面,通过模拟推进剂的流动和燃烧过程,CFD对于设计更高效的火箭发动机和推进系统至关重要。

### 2.2 加密算法

加密算法对于空天元宇宙的信任 and 可靠性是必要的,特别是在保障通信安全和数据保密方面。

#### 2.2.1 加密算法的基本原理

在空天元宇宙中,常用的加密算法主要包括对称加密算法和非对称加密算法。每种算法都有其特定的应用场景和优势。

在对称加密中,加密和解密使用相同的密钥。一个常见的对称加密算法是高级加密标准(AES),其加密过程可以表示为:

$$C = E_k(P)$$

其中, $P$ 是明文, $C$ 是密文, $E$ 是加密过程, $k$ 是密钥<sup>[44]</sup>。

常用的对称加密算法包括高级加密标准(AES)、数据加密标准(DES)和三重数据加密算法(3DES)。

在非对称加密中通常在加密和解密过程中使用两个非对称的密码,分别称为公钥(public key)和私钥(private key)<sup>[45]</sup>。非对称密钥对具有两个特点,



首先是用其中一个密钥加密信息后,只有另一个对应的密钥才能解开;其次是公钥公开,私钥保密,通过公钥推算私钥在计算上是极困难的。所以这种方式既能证明交易成功,又能保证私钥的安全性。

非对称加密的一般流程如下:

消息接收方准备好公钥和私钥;

私钥由接收方自己留存,公钥发开;

消息发送方使用接收方公钥对消息进行加密;

消息接收方用自己的私钥对消息解密。

流程如图3所示:

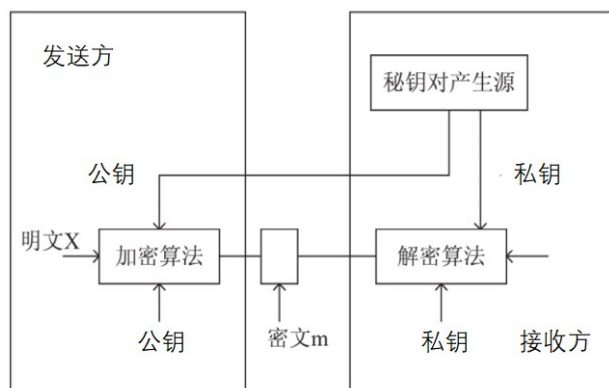


图3 非对称加密

Fig. 3 Asymmetric encryption

非对称加密的安全性是由现有算力下加密函数的反函数难以获取的特点所保证。目前主流的非对称加密算法RSA便是基于大整数的质因数分解的困难性<sup>[46]</sup>,其加密过程为:

$$C = P^e \bmod n$$

其中, $P$ 是明文, $C$ 是密文, $e$ 和 $n$ 是公钥的组成部分。而目前区块链使用的ECDSA算法则是基于椭圆曲线离散对数问题(ECDLP)的困难性<sup>[47]</sup>。

相比RSA算法,ECDSA具有计算量小、存储空间小、带宽要求低等特点,可以以更短的密钥获得与RSA算法相当或更高的安全性。空天元宇宙中,科学实验和生产制造所涉及的精密仪器和设备通常非常复杂,涉及到巨大的数据量和计算量,且对孪生实体的反馈要求实时性,所以ECDSA被空天元宇宙优先采用,进而降低加密算法对存储器和处理器的压力。

### 2.2.2 加密算法在空天元宇宙中的应用

对于安全通信,加密算法可用于保护空天元宇宙中各注册节点间通信、空天元宇宙与物理空间航天器间通信免受未经授权的访问和干扰。使用非对称加密算法安全地交换对称加密的密钥,然后使

用对称加密算法来加密实际的通信数据。这种组合方法兼顾了安全性和效率,适应了空天元宇宙中对高安全性和高数据处理效率的双重需求。

对于空天知识产权,加密算法支撑起的价值互联网能够做到安全、透明、可信的数据确权和价值转移,确保用户科学数字资产的完整性和真实性;

对于身份验证,加密算法可用于确保用户特别是科研人员身份的隐私性和保密性,防止虚拟环境中的身份盗用和信息篡改。

### 2.3 图论

图论在空天元宇宙的应用中扮演着至关重要的角色,特别是在分析和优化复杂的空间通信网络和合作系统方面。

#### 2.3.1 图论的基本原理

图论是研究图和图的性质及其应用的数学分支。图可以被表示为 $G = \{V, E\}$ ,其中 $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ , $E = \{e_1, \dots, e_M\}$ ,其中, $V$ 是节点的集合, $E$ 是连接两点的边即两点间关系的集合<sup>[48]</sup>,图4则是一种包含9个节点,边没有方向的无向图。

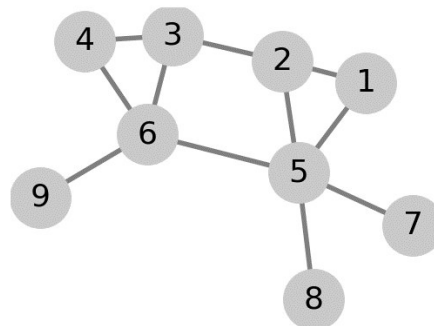


图4 9个节点的无向图

Fig. 4 Undirected graph with 9 nodes

在图论中,寻找两个节点之间的最短路径是一个基本问题。Dijkstra算法是一种常用的最短路径算法<sup>[49]</sup>,表示为:

$$D(v) = \min_{u \in N(v)} \{D(u) + w(u, v)\}$$

其中, $D(v)$ 是从源节点到节点 $v$ 的最短路径长度, $N(v)$ 是 $v$ 的邻居节点集合, $w(u, v)$ 是边 $(u, v)$ 的权重。

#### 2.3.2 图论在空天元宇宙中的应用

空天元宇宙的关键特征之一是互操作性,它允许不同节点之间的连接,图论用于分析空天元宇宙的拓扑结构,其中的节点表示用户和虚拟对象,边表示连接和交互。

在科研生产方面,图论可用于对航天科研团队的关系网络进行建模,并了解空天元宇宙中航天工程师或技术人员之间的沟通、协作和影响的动态;可用于建模和分析虚拟环境的物理结构,了解虚拟实验对象、位置和活动之间的关系。这对于创建更直观和用户友好的虚拟科研生产环境以及开发用于在虚拟空间内导航和搜索的算法非常有用。

在工程应用方面,图论可以用于优化卫星网络的拓扑结构,确保通信的高效性和可靠性;可以利用图论分析和优化航天器之间的相互关系,从而实现高效的编队控制和任务协调;可以用于优化资源分配(如频谱、能源)和航天器的轨道路径规划;可以用于分析空天元宇宙网络的脆弱点,进行故障检测,以提高系统的整体稳定性和可靠性。

## 2.4 量子信息学

量子信息学是量子物理与信息科学交叉的新兴学科,主要包括量子通信和量子计算。量子通信是一种利用量子叠加态和纠缠效应进行信息传递的新型通信方式,量子计算是一种遵循量子力学规律调控量子信息单元进行计算的新型计算模式。二者都遵循量子力学的基本原理。

### 2.4.1 量子信息学基本原理

叠加原理(Superposition Principle)和量子纠缠(Quantum entanglement)是量子信息学的核心概念。

量子纠缠是指处于纠缠态的两个粒子,无论相距多远,当其中一颗被操作(例如量子测量)而状态发生变化,另一颗也会即刻发生相应的状态变化的现象。

假设一个零自旋中性 $\pi$ 介子衰变成一个电子与一个正电子。在测量之前,这两个纠缠粒子共同形成了零自旋的“纠缠态” $|\psi\rangle$ 是两个直积态(product state)的叠加,以狄拉克标记表示为

$$|\psi\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2)$$

其中, $|0\rangle_1|1\rangle_2$ 表示原子1处于态 $|0\rangle$ ,原子2处于态 $|1\rangle$ ,反之则反。当这两个原子处于叠加态 $|\psi\rangle$ 时,只知道一个原子处于态 $|0\rangle$ ,一个原子处于态 $|1\rangle$ ,并不知道哪个原子处于态 $|0\rangle$ ,哪个原子处于态 $|1\rangle$ ,两原子是纠缠在一起的<sup>[50]</sup>。

### 2.4.2 量子信息学在空天元宇宙的应用

在通信方面,量子通信技术可以用于实现超越传统通信限制的安全通信。利用量子纠缠和量子密钥分发(Quantum key distribution, QKD)技术,可

以在地面站与航天器之间建立安全的通信链路。

量子密钥分发,是利用量子力学特性来保证通信安全性。它使通信的双方能够产生并分享一个随机的、安全的密钥,来加密和解密消息。其不可破译性是未知量子态的不可克隆原理保证的<sup>[50]</sup>。量子密钥分发克服了经典加密技术的内在隐患,是迄今唯一被严格证明无条件安全的通信方式。

在数据处理方面,量子计算在处理大量空间数据和执行复杂空间任务的优化中具有潜在优势。量子算法,如Shor算法和Grover算法,可以用于加密解密和搜索优化。

另外,空天元宇宙还可以借助量子纠缠和量子超定位技术提高航天器定位的精度,这对于深空探测和精确轨道控制至关重要。

## 2.5 控制理论

在空天元宇宙中,控制理论不仅涉及通过使用算法和反馈机制来精确操纵系统的行为,以确保航天器和卫星的稳定运行和有效导航,还是对整个空天环境实现动态管理和优化的关键。

### 2.5.1 控制理论的基本原理

控制理论的核心是设计和实现控制系统,以使动态系统的输出达到期望的性能。基本原理包括:

系统模型:描述系统动态的数学模型。对于线性时不变系统,常用的描述形式是状态空间表示:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t)\end{aligned}$$

其中, $x(t)$ 是状态向量, $u(t)$ 是输入向量, $y(t)$ 是输出向量, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 是系统矩阵。

反馈控制:使用系统的输出来调节输入,以达到期望的系统性能。PID(比例-积分-微分)控制是一种常见的反馈控制策略,其控制律为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中, $e(t)$ 是期望输出与实际输出的误差, $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 是控制器的比例、积分、微分增益<sup>[53]</sup>。

稳定性分析:系统的稳定性是控制理论的一个重要方面。利用如Lyapunov稳定性理论来分析系统的稳定性。对于一个线性系统,如果其所有Lyapunov指数都小于零,则系统是稳定的。如果存在大于零的Lyapunov指数,则系统是混沌的<sup>[54]</sup>。

### 2.5.2 控制理论在空天元宇宙的应用

在航天器姿态控制方面,在空天元宇宙中,精确的姿态控制对于航天器的导航和定位至关重要。



控制理论用于设计算法,以确保航天器能够准确响应外部扰动和内部指令,保持或改变其方向和姿态。例如,姿态控制系统(ACS)可能使用PID控制器来最小化姿态误差。在更复杂的情况下,如三轴稳定化,可能需要使用状态反馈控制或现代控制理论。

在轨道控制和调整方面,在空天元宇宙中应用控制理论来对物理空间中的航天器计算和实施轨道机动,包括轨道插入、轨道修正和轨道转移。状态空间模型用于预测航天器在不同推力下的轨道变化。此外,轨道动力学的控制可能涉及到最优控制理论,以最小化燃料消耗。

在自主导航和避障方面,在空天元宇宙的卫星群和航天器管理控制系统中,应用高级控制算法,如模型预测控制(MPC),以实现自主导航和避免碰撞。MPC可以处理多变量控制问题,并能预测未来的系统行为,从而提前做出调整。

在地面控制系统方面,在空天元宇宙中设计地面控制系统以远程监控和调整航天器的行为。这通常涉及到复杂的控制算法和实时数据处理。例如,地面站可能使用自适应控制或鲁棒控制来应对不确定性和模型误差。

## 2.6 小结

本章节深入探讨了空天元宇宙的数理基础及其在航天领域的广泛应用。通过对计算流体动力学、加密算法、图论、量子信息学和控制理论的细致分析,不仅揭示了这些学科在理论上的重要性,而且展示了它们在实际航天工程中的关键作用。从航天器的设计优化到通信安全,从复杂网络的分析到精确的控制系统,这些数理工具为空天元宇宙的构建和发展提供了坚实的理论支撑和技术基础。

在接下来的第三章中,将深入探讨空天元宇宙中的关键技术,这些技术是实现空天元宇宙愿景的核心,而本章的内容将成为构筑这些关键技术的底层原理。紧接着的第四章将聚焦于空天元宇宙的应用场景,探讨这些技术和理论如何在具体的应用中实现创新和突破,以及它们如何影响和改变我们对空间探索和利用的理解和方法。通过这些章节的深入分析,将全面展示空天元宇宙作为一个多学科交叉领域的巨大潜力和未来发展方向。

## 3 空天元宇宙的关键技术

在《元宇宙通证》一书中,作者邢杰总结了支撑元宇宙的六大核心技术:AI人工智能技术、网络及

运算技术、物联网技术、区块链技术、交互技术、电子游戏技术<sup>[55]</sup>。这些技术也是空天元宇宙的基础。本章节对支撑空天元宇宙的独有关键技术进行了归纳,包括航天数字孪生技术、天地一体化高速网络、广域超高速智能感知技术和脑机交互技术,如图5所示,分析了上述技术在空天元宇宙中的地位或发挥的作用,对其目前对于实现空天元宇宙存在的不足进行了总结,并提出了相应的解决方案。

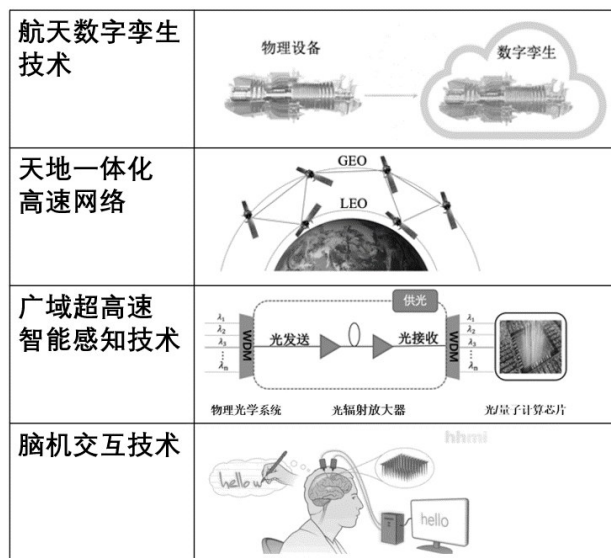


图5 空天元宇宙的核心技术

Fig. 5 The core technology of Aerospace Metaverse

### 3.1 航天数字孪生技术

航天数字孪生技术是构建空天元宇宙的基础。

数字孪生技术主要由物理实体、虚拟模型、服务、孪生数据以及它们之间的连接交互组成<sup>[56]</sup>。航天数字孪生技术是充分利用航天装备的物理模型、传感器更新、运行环境、运行历史等数据,融合多物理量、多尺度、多概率的,可视化、可交互、自修正、自由化的智能仿真过程,能够在空天元宇宙中映射实体航天装备的全生命周期,提高航空航天工程的效率、安全性和可靠性。全域标识、多传感器融合等技术提供了对所需映射对象感知的数据基础,辅以人工智能对海量数据的自我学习,实现孪生副本的并行迭代和自我优化,从而通过虚实交互保障航天装备的安全运行、生产车间的高效运作、军事场景的真实模拟和用户顺畅的沉浸交互体验。图6展示了与物理世界实时双向交互的海、陆、空、天、网一体的空天元宇宙示意图。

现有的技术对于实现虚实融合的空天元宇宙,还有如下不足。

航天数字孪生中物理引擎不完善,无法精确模拟孪生模型的动态运行。原因有两个方面。一方面,物理引擎对对象位置和作用在对象上的力的数字精度无法满足航天实验和装备生产中对低误差的要求;另一方面,现有算力无法满足对孪生仿真过程中海量数据的处理。以航天装备的数字孪生车间为例,多参数多物理量的微小模型误差会随生产线迭代放大,无法有效监测和预警生产错误,造成实际生产的装备无法满足技术指标。针对这一困境,一方面需要开发专用的物理引擎,特别是针对性优化能够模拟航天器行为所需的计算流体力学等原理的引擎,提高对对象位置和作用力的数字精度;另一方面,借助全光感知和量子计算,实现广域超高速智能感知技术,以突破算力瓶颈,这部分将在3.3节展开论述。

由虚到实的反馈技术存在空缺。对于用户,现阶段交互设备多局限于视觉和听觉呈现,缺少触觉和嗅觉反馈。而脑机交互利用电信号刺激大脑代替外部的化学和物理反馈,为沉浸式的全感官交互提供了可能,这部分将在3.4节展开论述。对于航天设备,需建设完善的空天物联网,实现数字孪生副本与物理空间中的要素实体的虚实互控和同步映射,例如通过人工智能对数字孪生航天装备车间的运行监测和参数分析,生成生产流程的调整或参数优化方案,并自动应用到实际系统中。

另外,真实宇宙运行原理的掌握、高置信度数学模型的建立、海量高精度数据的实时修正、不同技术和数据标准之间的互操作性、复杂模型的可扩展性以及高效的虚实映射方法也是航天数字孪生必须克服的难题。

### 3.2 天地一体化高速网络

天地一体化高速网络将成为空天元宇宙的重要基础设施。

空天元宇宙的信息传输,包括内部节点间的信息传输、空间环境与航天器所包含的信息到空天元宇宙的映射过程以及虚拟空间的信息和操作到现实空间的反馈过程,需要依靠第三代互联网保证大量的数据交换,以支持航天数字孪生技术。其中海量太空、大气、地面、海洋数据的实时采集和的传输必须依靠连通空、天、地、海的高速立体网络实现,由星间、星空、空空、星地和空地链路将全域的用户、飞行器及各种通信平台密集联合而组成的具有大时空尺度属性的天地一体化立体高速网络,将成

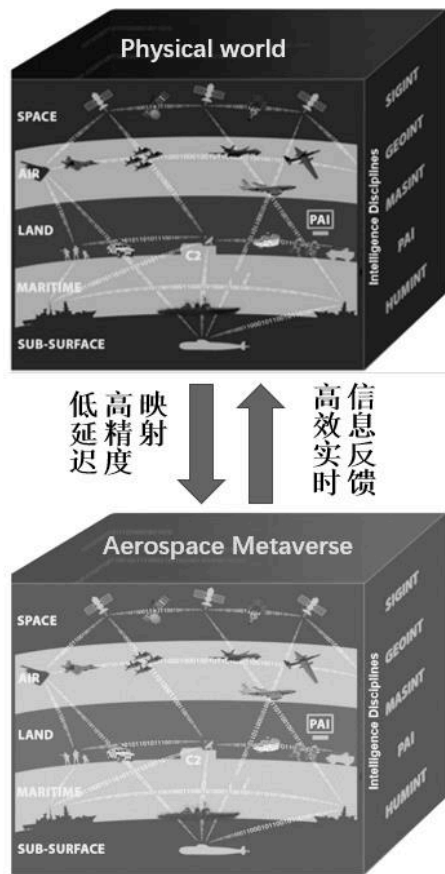


图6 航天数字孪生示意图

Fig. 6 Schematic Diagram of Aerospace Digital Twins

为空天元宇宙的重要基础设施。

各国正积极建设低轨卫星通信星座,以提供多类型、高质量、稳定可靠、规模化的天基信息服务。在传输效率方面,当前卫星通信普遍使用的微波通信方式难以满足空间网络最高传输带宽40到100GB/s的需求<sup>[57]</sup>,且在各国都在发展大型低轨星座的环境下,通信频率资源日益枯竭,空间激光通信将缓解这一困境;在传输安全性方面,现有通信加密手段多依赖计算复杂性,未来易被量子计算破解,威胁虚拟科研资产及其孪生实体的安全,而空间量子通信凭借量子密钥分发和量子隐形传态将为空间资产安全提供有力保障。

#### 3.2.1 空间激光通信

相较于传统通信,空间激光通信以激光为载体,具有高带宽、低延迟、方向性好、低成本、小尺寸等<sup>[58]</sup>。激光通信按照传输方式不同,分为光纤通信(Optical fiber communications)和自由空间光通信(Free space optical communication),对于立体空间网络体系中的星间、星空、空空、星地和空地链路,由于通信距离过长,自由空间光通信相比地面光纤效



率更高,地面链路则可以使用可靠性更高的光纤通信实现。

高速激光通信采用高阶调制方式,如正交相移键控(QPSK)、正交振幅调制(QAM)和复用方式如波分复用(WDM)、时分复用(TDM)、轨道角动量复用(OAM)。

空间激光通信正从星际链路逐渐向星地、星空、空空、空地和地面间链路拓展,通过空间高通量全光网络提高宽带数据传输能力,未来速率有望达到 100Gb/s 量级,实现全域立体覆盖通信网络,在空天元宇宙的建设中应充分重视。

### 3.2.2 空间量子通信

相比激光通信,量子通信在传输距离和传输速率上并无优势,但是其保密性是经典通信无法媲美的,对空天元宇宙中的信息安全具有重大价值。

理想情况下,量子通信具有香农所谓的“绝对安全性”,使用的是一次一密(One-Time-Pad)的对称加密,密钥不存在被窃听的可能性<sup>[59]</sup>,无法被高算力的计算机破解,且传输效率极高,在 1200 公里通信距离上,“墨子号”星地量子密钥的传输效率比同等距离地面光纤信道高 20 个数量级<sup>[60]</sup>。

目前,主流的量子通信协议包括纠缠光子信息的量子隐形传态通信协定、量子密集编码通信协定,采用单光子信息的 BB84 量子通信协议、B92 协议和六态量子通信协议等<sup>[61]</sup>。在星地上行链路中,“墨子号”实验通信距离从 500 公里到 1400 公里,所有 6 个待传送态均以大于 99.7% 的置信度超越经典极限<sup>[60]</sup>。

目前,空间量子通信还存在下列问题:

1) 可以控制的电激发的单光子源尚未实现,在量子点光源的规模、形态一致性、光的发光特性等方面存在诸多困难<sup>[62]</sup>;

2) 光量子通信存储器还处于理论研发和实验验证的阶段;

3) 在保证安全密钥率的前提下,量子通信受天气影响较大。刘涛等的实验<sup>[63]</sup>中,在集体攻击下采用零差检测和 3800 nm 波长时,在重度雾霾和大雪天气下只能分别传输约 0.28 km 和 0.26 km,星地链路的安全传输将受影响;

4) 空间量子通信仍依赖经典信道,只能保证信号传输的过程的安全,而在发射、接收、计算、存储等环节仍是不能保证的。

### 3.3 广域超高速智能感知技术

广域超高速智能感知技术是保证空天元宇宙海量数据及时处理的核心。

在打造空天元宇宙的过程中,需要采集现实宇宙的信息,实现全域感知,传统的光电感知技术是通过光电成像探测技术实现对外部世界的精准掌控,实现途径是将光学系统接收到的光信号转换为电信号,从而达到对人类视觉的模拟和拓展的目的。现有的光电感知技术被广泛应用在航天、医疗、工业生产等领域,但该技术中的光电转换过程会造成信息损失,且电域相关的器件与系统受到制程瓶颈与电子固有属性限制,难以达到算力和功耗要求。

利用光计算替代传统电子计算方法突破通用图灵机在摩尔定律上的瓶颈,利用量子计算替代经典计算在特定问题的算力上实现指数式增长。全光感知与量子计算,将成为空天元宇宙虚实映射与信息交互的重要技术支撑。

#### 3.3.1 全光感知

针对这一问题,本团队提出了全光感知的概念,即在不经光-电转换的前提下,以光子为信息载体,基于光学单元构建的光学系统,通过必要的光学操作,从而实现信息的处理或数据的运算操作。本团队提出了三种全光感知的技术路线,其概念图及主要组成部分如图 7 所示。这种在光域实现感知的方法相较于传统的光电感知技术,具有二维并行处理、高速度、大容量和抗电磁干扰等优点。

#### 3.3.2 量子计算

量子计算是通过调控量子信息单元进行计算的新型计算模式<sup>[64]</sup>。其理论模型是用量子力学规律重新诠释的通用图灵机,遵循量子纠缠和不确定性原理。

量子计算主流的技术路线有超导、半导体、离子阱、光子以及量子拓扑这五个方向。尚无任何一种路线能够完全满足实用化要求并趋向技术收敛。其中进展较快的是超导量子 and 光子量子方向。

量子计算的优越性体现在信息的表示、存储和处理上。在量子计算机中信息的基本单元是量子比特(qubit),用狄拉克算符表示为 $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle$ ,以两个逻辑态的叠加态的形式存在,即量子态 $|\Psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ ,量子信息和量子数据便可被表示和储存为上述量子态的形式,这不是经典计算所使用的实线性空间,而是 Hilbert 空间。由于量子



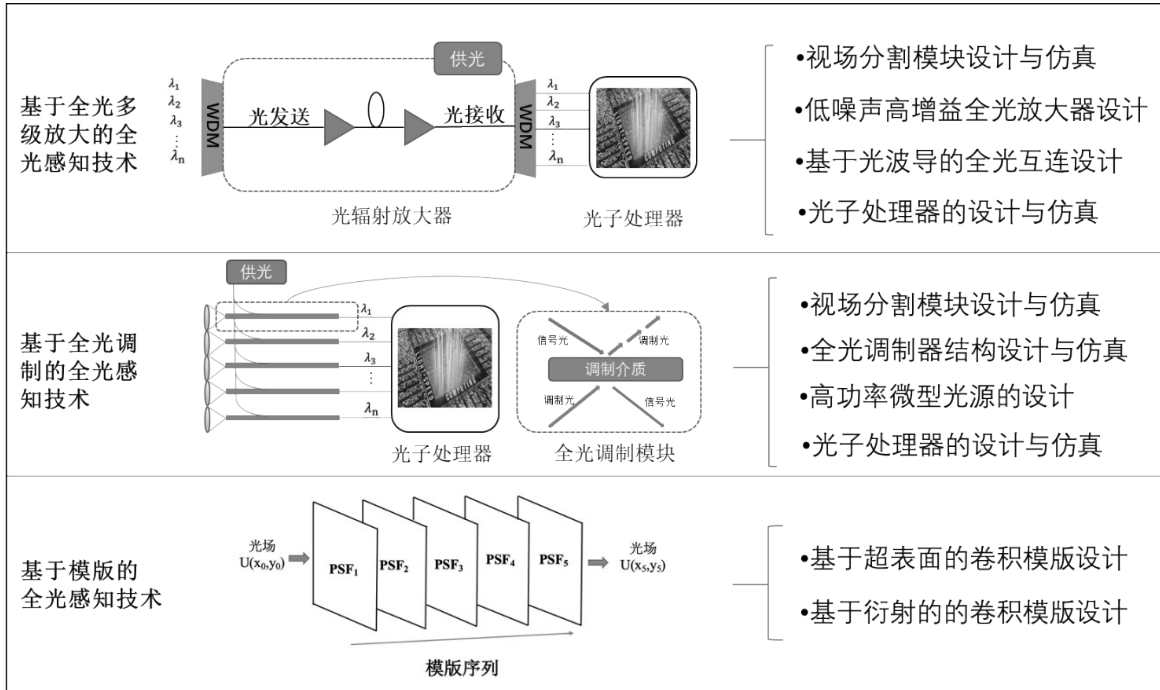


图7 全光感知的三条技术路线概念图

Fig. 7 Conceptual map of three technical routes for all-optical perception

态的叠加性,量子计算在表示空间和存储空间上相较于经典计算随量子比特的增加呈指数规模增长。所以,对于特定问题,当求解问题的代价与输入数据的规模呈指数关系时,传统通用计算需要指数规模的代价(时间或空间),而量子计算只需要多项式时间<sup>[65]</sup>。

量子计算同样有其局限性。在算法上,目前量子计算被认为相对于经典计算有显著加速的算法主要有两类:量子搜索型算法和量子隐藏子群型算法<sup>[66]</sup>,典型代表分别为Grover算法和Shor算法,部分算法如量子计数算法,可同时属于上述两类,因此现阶段量子计算机所解决问题的类型相比经典计算较为局限,多设计为解决单一类型问题,或通过牺牲一部分通用性换取更高的计算性能;在实际需求中,专用量子计算机相比通用量子计算机在体系结构、控制方式和易用性方面均有优势<sup>[65]</sup>。

### 3.3.3 全光感知与量子计算相结合

构建空天元宇宙所涉及的庞大数据量与现阶段算力不足之间的矛盾,在未来需要依靠全光感知和量子计算相结合的广域超高速智能感知技术来解决。未来首先通过增加量子体积提升算力,构建专用量子计算机,在空天元宇宙中对传统超算难以解决的特定类型问题进行求解;利用全光感知解决通用问题的算力困境,弥补量子计算在计算问题类

型上的局限性;另一方面,加强量子算法的研究,提高在量子纠错顺利完成的基础上,寻找更多空天元宇宙中的问题关联到量子计算框架的映射,并发展适配的量子算法,提高可解决问题的规模,尝试将“量子优越性”发展到更通用的问题类型上。

### 3.4 脑机交互技术

脑机交互技术是实现空天元宇宙沉浸式体验的关键。

《黑客帝国》中锡安人通过脑机接口,迅速学习各类技能,并进入Matrix虚拟世界中;《沙丘》中人们通过脑科学的探索,不断开发大脑潜能,通过训练的领航员的大脑能够媲美大型计算机。这些情节都让人印象深刻。上述人机交互技术正是实现空天元宇宙虚实融合的基础。

#### 3.4.1 现有人机交互技术的不足

目前主流的交互技术有XR(包括VR、AR、MR等)、全息成像等。

目前,以XR技术为代表的人机交互技术还存在很多痛点,与空天元宇宙的需求存在着显著差距:

- 1) 门槛高,VR、AR、相机等设备较为昂贵;
- 2) 可进入性差,需要较多硬件支持,佩戴设备麻烦,使用前需要校准,无法随时随地进入元宇宙;
- 3) 缺少反馈,人机交互目前多集中于机器单方

表 2 现在和未来的人机交互技术对比

Table 2 Comparison of current and future human-computer interaction technologies

现在的人机交互	未来的人机交互
VR 头盔	脑机交互
采集肢体运动	采集脑电信号
需要较大空间	不受空间限制
缺乏感官反馈	多维沉浸式感官交互
实到虚的单向信息	虚实双向交互

面接受人体输入并仅对听觉和视觉进行反馈,缺少触觉反馈,用户无法从触觉上实时感觉到自己的操作是否生效,无法做到元宇宙要求的真正的沉浸感;

4) 场地限制,用户的躯体行动受到场地的严重限制,自由度较低,容易受伤。初级的解决方案是类似《头号玩家》中的万象跑步机,目前这项技术已有多家公司推出产品,但还不成熟。

对于上述不足,未来的解决方案是脑机交互技术。表 2 对比了现在和未来的人机交互技术的特点。

3.4.2 空天元宇宙中的脑机交互

脑机接口(Brain Computer Interface, BCI) 1976 年由加州大学洛杉矶分校的雅克·维达尔(Jacques J. Vidal)提出<sup>[67]</sup>。2021 年斯坦福大学 Jaimie Henderson 和 Krishna Shenoy 的团队实现了将脑中想象的“笔迹”转化为屏幕上的文本<sup>[68]</sup>,其概念如图 8 所示,该成果在 Nature 上发表,这种更为高级的人机交互技术将促进空天元宇宙虚实相生。

空天元宇宙中的脑机交互流程包括大脑信号采集、信息预处理、信号分类、信号执行、反馈和自适应六个步骤:

- 1) 大脑信号采集:获取将用于控制接口的大脑信号,通常使用非侵入性技术完成,例如脑电图(EEG)、功能性磁共振成像(fMRI)或脑磁图(MEG);
- 2) 信号预处理:对原始大脑信号进行预处理,以消除噪声和伪影,并提取可用于控制接口的相关特征,涉及过滤、工件拒绝和特征提取算法等;
- 3) 信号分类:使用机器学习算法将预处理的信号分为不同的类别,以允许系统根据用户的大脑活动确定用户的意图;
- 4) 信号执行:分类后的信号输出至执行模块,发出指令控制元宇宙中的用户孪生副本完成相应



图 8 脑机接口概念图

Fig. 8 Conceptual diagram of brain computer interface 在空天元宇宙中,交互技术更为复杂。相比 VR、AR 等交互设备,脑机交互更像是梦境,机器通过捕获分析人类的大脑信号允许用户仅靠意识控制在空天元宇宙中的行为并获得逼真的感官反馈,破除了复杂外设和场地的限制。例如,对于航天技术人员,脑机交互允许其无需进行实际肢体操作便可以在空天元宇宙中进行对复杂航天设备的精细操控,缺乏反馈的手动交互设备则难以实现;对于航天员,脑机交互可以借助其高精度物理引擎模拟更真实的太空场景,辅助航天员进行对于失重训练;对于军队,脑机交互允许其精细化操控复杂的作战系统、驾驶无人战斗机、进行虚拟军事演练等;对于身体有残疾或行动不便的人群,脑机交互技术帮助他们在空天元宇宙中实现行动自由,甚至实现星际旅行;对于像霍金一样的残疾科学家,脑机交互允许其大脑里的想法转化为真正有助于人类发展的科学价值。

操作,或输出到数字孪生的终端以形成机器指令,实现直接交互;

5) 反馈:在信号执行时,元宇宙反馈模块将同步触发反馈信号,并在大脑中转换为视觉、触觉或听觉信号,使用户感知大脑信号已被执行。

6) 自适应:系统通过自适应算法学习用户大脑信号随时间的变化,例如由于疲劳或精神状态变化而发生的变化,并根据积累的脑信号数据学习该用户的个人习惯或常用指令。该算法可以根据实时反馈调整分类模型。

3.5 小结

在空间元宇宙的构建过程中,本章节提出利用空间激光通信和空间量子通信技术相结合的天地一体化高速网络解决数据传输问题,利用全光感知与量子计算相结合的广域超高速智能感知技术解决数据处理的算力困境,航天数字孪生结合物联网实现虚实双向映射,脑机交互为用户接入元宇宙世界、沉浸式获取信息和操作提供技术支撑。上述这些技术是空天元宇宙构建的基础,空天元宇宙的建设也将大大推动这些技术的发展,使航天科技迈入元宇宙时代。

## 4 空天元宇宙的典型应用场景

### 4.1 多源立体沉浸式观测系统

多源立体沉浸式观测系统是利用从不同角度和时间获取的多个信息源的信息(如遥感数据、地理信息系统 GIS 数据、地面观测数据等),通过广域超高速智能感知技术进行数据融合和计算机视觉技术重建三维模型后,从而在监测区域范围内,针对所需观测的特征构建实时映射,创造一个虚拟空间,观测者可以利用智能交互设备进行多维度多尺度的沉浸式观测。

该系统可以进一步分为多源信息感知模块、信息融合算法、沉浸式交互设备三个主要部分。多源信息感知模块中包含有多种感知手段,用户可以根据检测任务的需要选择不同精细度的感知技术,例如在重点目标的安全保卫任务中,可以利用多层次、多尺度的遥感技术获得不同精细度的信息,地面的各类传感器作为补充,进一步提高映射环境的信息丰富度。

信息融合算法的任务是将上述信息源的信息进行融合,在这个过程中需要对多源数据进行合理的支配和使用,最终产生对观测环境的一致性理解。交互设备则是用户融入观测环境的工具,用户可以更为直观的获取信息,在此基础上还可以在虚拟环境中进行操作,来实现对监测环境的调控。

该系统与平面图像为主的遥感解译系统相比,能更真实全面地向人脑反馈航天广域信息,并实现所见即所得。

### 4.2 虚拟军事训练和全域联合作战系统

未来战争的典型特点是数字化、无人化、跨域协同。随着数字化水平的不断提高,在作战过程中各个终端产生大量的信息,从其中筛选有价值的信息并快速做出决策是战争取胜的关键。美国洛克希德·马丁公司在 2020 年 6 月发布的一份白皮书中指出,联合全域作战将主要武器系统与关键信息源革命性的进行简化和同步;2021 年 8 月,洛克希德·马丁公司为美军升级了其导弹防御系统,提高了多域指挥和控制能力,初步运用元宇宙概念。针对这一战争新态势,笔者认为可以将海、陆、空、太空、网这五个域所产生的信息整合到空天元宇宙中,应用于战场环境的假定、模拟和更新,贯穿智能化战争全过程。数字孪生战场环境是真实战场环境的映射,是战场环境数字化的高级阶段,解决了真实战场与数字化战场之间存在数据分离,难以实现信息

闭环流动的难题,实现虚实战场环境之间的实时数据共享和双向互操作。

战前,利用空天元宇宙进行智能化作战力量的研发与生产,协调处于不同区域的专家资源,提高研发团队协同效率,并以大数据系统提供的大量武器数据集和高精度的物理引擎为辅助,进行武器测试和仿真试验,从而提高武器研发效率,降低试验的成本和风险,加速奠定智能化战争的稳固地基;将空天元宇宙作为虚拟训练演习的平台,建立虚拟战场和敌人,允许军事人员在受控和安全的环境中模拟真实作战,评估不同作战方案的效果;用于计划和排练军事任务,为指挥官提供一个平台,在现实世界中执行任务计划之前对其进行可视化和测试。

战时,空天元宇宙可用作情报、监视和侦察(ISR)平台,允许特工使用虚拟身份在空天元宇宙中隐蔽地执行任务,更容易接近敌方探取情报,且空天元宇宙中信息和事件可以被记录和跟踪,这便于情报更好地被分析和评估;另外,空天元宇宙协调下的多功能卫星星座和大数据分析系统将在太空领域的情报收集处理起到重要作用,利用所载的光电遥感器或无线电接收机等侦察设备,从轨道上对目标实施侦察、监视或跟踪;数字孪生技术通过整合当下实时作战力量和作战环境数据,预测评估未来的状态,先进的信息处理算法可以让各级指挥决策机构及时获得从各级终端上传并处理的战场态势,帮助指挥官在最短时间内形成最佳决策;空天元宇宙还作为分布式协同作战的平台,促进来自不同地点的各级作战单元的协作,进行跨域信息交互,实现去中心化的多区域、多军种、多层级的联合作战指挥,如图 9 所示;空天元宇宙还可以集成以智能装备、大数据采集和分析模块以及自动控制和调度模块为核心的智能作战系统,借助组网卫星、无人机、无人战车等装备上的传感器获得的大量战场信息,利用人工智能进行实时兵力调度,并自动对武器装备的行进方向、攻击目标选择等发出指令,形成自动化作战部队。

战后,借助数字孪生系统进行局势复现,对作战过程逐帧分析,对各个参战方的行为和战术进行模拟,快速掌握敌我作战力量状态,进行作战效果评估,为下一步行动提供战略参考。

### 4.3 空间安全感知与远程协作维护

近年来近地轨道的空间与频率资源日益拥挤,



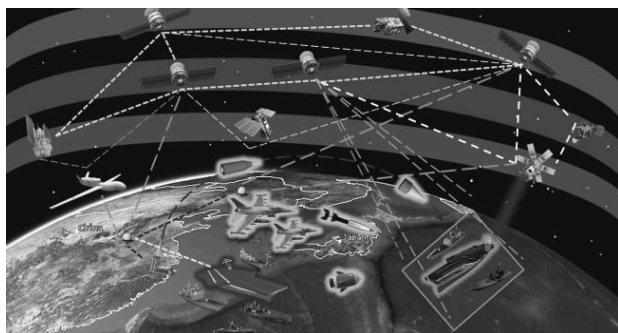


图9 多源立体感知与全域联合作战示意图

Fig. 9 Schematic diagram of multi-source stereo perception and all-domain joint operations

近年来随着发射成本的降低,地球轨道上的物体数目快速增长;截至2022年底,全球在轨航天器数量达到7218个<sup>[69]</sup>,此外根据美国国防部全球太空监视网络的数据,近地空间还有27000个能够被追踪的太空碎片。地球轨道环境的日益拥挤使各国航天器的运行风险增加,2021年10月,美国SpaceX公司的Starlink卫星先后两次接近中国空间站,使中国空间站采取了紧急规避措施;卫星的碰撞事故近年也时有发生,2013年厄瓜多尔的NEE-01 Pegaso与阿根廷的CubeBug-1发生碰撞,同年俄罗斯BLITS科研卫星与中国FY-1C碎片发生碰撞。空间资产安全关系到国家和人民的利益,抵进的卫星、飞掠的碎片严重影响了空间飞行器的安全,如何更加高效的利用轨道和频率资源成为了近年来各国关注的重点。

针对上述问题,本文提出基于空天元宇宙的空间安全感知与远程协作维护系统,允许各机构、公司在空天元宇宙中进行信息的互联和共享,利用区块链技术在进行公开信息共享的同时保证机密信息的安全,进而保障航天器的运行安全,促进轨道、频率资源的充分利用。在此基础上,航空航天工程师和技术人员在共享的虚拟环境中实时协作,通过元宇宙与卫星的各个系统互联技术,例如以维修机器人作为元宇宙中技术人员在物理世界的孪生实体,在元宇宙中完成对物理世界中空间飞行器的姿态控制、参数调整、维护维修等操作。

#### 4.4 航天任务规划与虚拟制造平台

航天研发的资金投入高,风险高,空天元宇宙可用于规划和协调航空航天实验任务,为任务规划者提供一个平台,在执行之前可视化和测试他们的计划;可用作虚拟设计和原型制造平台,允许工程师在虚拟开发环境中测试和完善设计,借助航天数

字孪生技术进行设计优化、性能评估、故障诊断等,并利用物联网同步构建或修改物理世界中的孪生实体。

空天元宇宙中的生产制造体现了元宇宙的虚实结合。工程师在元宇宙中完成航天装备的可视化设计、性能仿真和参数调试后,制造平台及其孪生副本共同完成方案的执行。放置在整个航天装备制造车间的物联网传感器向其数字孪生副本馈送数据,通过实时监测各项指标并利用大数据预测孪生模拟工厂的行为,从而预防可能发生的故障,进行流程的智能优化,进而通过物联网重新反馈到物理空间以优化后方案完成真实系统的装配流程,或利用自动化技术完成零件的替换或维修等。

空天元宇宙在赋予研发人员更高的沉浸度的同时,通过高精度的物理引擎,对真实实验场景中的数理机制进行模拟,大大降低科研试错成本,赋予研发人员更高的自由度、更激进的方案选择和更安全的实验环境,提升了工程的生产效率。

#### 4.5 星际文明在线平台

实现星际航行一直是人类的向往,根据卡尔达肖夫指数,目前人类已经达到了I型文明耗能的73%,达到II型文明还至少需要数百年时间<sup>[70]</sup>;此外考虑到当前科技发展现状、人类的生理心理因素,自由的星际航行还不具有可行性,针对此笔者认为可以在空天元宇宙中进行星际文明建设,通过高度仿真的场景复现使用户低成本、低门槛、高沉浸感和真实感地进行虚拟星际航行、文化教育、政治经济活动等。构建这个元宇宙的基础是海量传感器所感知的宇宙信息,利用海量数据对真实宇宙中天体的内外部信息进行建模,并加入物理引擎,进行进一步渲染,增强其真实感。现阶段用户可以通过VR等设备进行交互,在未来通过脑机接口,有望在空天元宇宙中实现不同尺度的时空感知,现实世界的时间在元宇宙中被拉伸或缩短,现实世界的空间在元宇宙中被缩小,增加用户的沉浸感和自由度。

在空天元宇宙中建立空天教育和探索平台,允许不同身份的用户根据自身需求获取所需的数据,这将极大地拓展用户对真实宇宙的认知方式。航天爱好者不再局限于书籍、网络或博物馆获取图文信息,而是可以在元宇宙中进行高沉浸度和自由度的空间探索,用户无需进行严格的体能筛选和耗时的星际旅行便可以对人类已经掌握信息的星球进行虚拟登陆,自由跳转到感兴趣的区域在数字孪生

场景中进行实景探索,获取卫星的轨道高度及倾角、过境时间、速度、质量等信息。随着信息和技术的完备空天元宇宙的覆盖尺度会逐渐扩大到更广的空间范围。这样的平台不仅能吸引大量航天爱好者,还能凭借其沉浸式和低门槛的知识获取方式,增长更多普通用户对航天领域的兴趣。

在基于空天元宇宙的星际文明在线中,人们以数字身份参与太空、航天活动及其衍生世界,与真实世界虚实共生、迭代演化,实现航天活动的数字智慧空间,这个空间是去中心化的,个体创造的数字化价值得到保护,并能通过空天物联网转化为真实世界的客观价值,推动航空航天、信息电子、数学、光学等相关学科的发展。

#### 4.6 飞行与航天训练平台

空天元宇宙可用于飞行模拟,允许飞行员在与现实世界条件非常相似的虚拟环境中进行训练。飞机在高速变化气流中的飞行模拟,在物理世界中依靠风洞设备,而在空天元宇宙中则是借助高精度的物理引擎模拟空气动力学,以多源信息感知模块为手段,直接观测气流的变化,并同时获取飞机各部分的受力数据,测试飞机在不同的速度、高度或者是姿态下的数据。

在空天元宇宙中,脑机接口技术的应用为航天员训练提供了新的可能性,特别是在模拟失重环境方面。通过脑机接口,航天员可以在虚拟环境中体验失重的感觉,进行各种任务的模拟训练,如空间站的维护、模拟星球登陆等。这种训练方式相比于传统的失重模拟方法,如失重飞机或中性浮力水槽<sup>[71]</sup>,具有成本低、风险小的优势。

然而,脑机接口模拟的失重训练也存在一定的局限性。失重环境对航天员不仅是一种主观感受,还包括对身体的物理影响,如肌肉萎缩和心脏功能障碍。当前的脑机接口技术主要是通过视觉和听觉刺激来模拟失重感觉,但无法完全复制长期失重对人体生理的影响。因此,尽管脑机接口可以提供有效的心理和技能训练,但它不能完全替代传统的失重训练方法。

为了更全面地准备航天员面对真实的太空环境,建议结合使用脑机接口技术和传统的失重训练方法。例如,可以利用脑机接口进行任务操作和应急反应训练,同时通过物理方法进行身体适应性训练。此外,未来的研究可以探索如何通过脑机接口技术模拟更多的物理反馈,以提高训练的真实性和

有效性。

#### 4.7 小结

本章节从航空科技的发展趋势、空间环境面临的问题以及用户的需求出发,提出了多源立体沉浸式观测系统、虚拟军事训练和全域联合作战系统、空间安全感知与远程协作维护、航天任务规划与虚拟制造平台、星际文明在线平台、飞行与航天训练平台这六个空天元宇宙的应用场景。

在空天元宇宙中,多源立体沉浸式观测系统提供一个综合多源数据的平台,通过数据融合和三维可视化技术,创造出比传统遥感更丰富、更立体的观测体验,以解决受限于二维图像的传统遥感技术中空间数据解读的局限性,特别是在复杂地形和动态环境监测方面;虚拟军事训练和全域联合作战系统通过高度逼真的模拟环境,提供一个安全、可控的训练和模拟平台,以解决传统训练方法成本高且风险大的痛点,使训练和模拟更加灵活和多样化;空间安全感知与远程协作维护系统通过集成和分析多源数据,提供更高效的监控和维护解决方案,以缓解太空资源紧张带来的对空间资产安全的威胁;航天任务规划与虚拟制造平台通过提供一个高度逼真的虚拟环境,提高任务规划和设计过程的效率和准确性,它还支持多方协作,提高设计和规划的灵活性和创新性,以解决传统的航天任务规划和制造过程中存在的高成本、长周期和高风险等问题;星际文明在线平台提供一个虚拟的、互动的宇宙环境,允许用户以数字身份参与模拟的太空探索和航天活动,弥补了传统平台难以提供的互动性和沉浸感;飞行与航天训练平台提供一个高度逼真的模拟飞行和训练环境,以解决传统的航天训练方法成本高、风险高的痛点。

这些应用场景充分利用了空天元宇宙的特有优势,为用户提供了沉浸式的信息获取和处理方式,同时也将大大推动相关技术,尤其是多尺度、多维度的感知技术的发展。

### 5 总结与展望

#### 5.1 总结

本文通过认知现代空间与航天科技的发展趋势,提出了空天元宇宙的概念,深入探讨了空天元宇宙的发展概况、数理基础、核心技术,并深入探讨了其未来的典型应用场景。空天元宇宙作为一种新兴的技术平台,不仅提供了进行航天科研生产活动的新视角和新方式,也对通信、计算和交互等技



术提出了新要求。通过集成先进的数字工程和航天科技,空天元宇宙为用户提供了一个沉浸式、多维度的信息获取和处理方式,这在很大程度上推动了相关技术的发展。

## 5.2 未来展望与挑战

随着空天元宇宙的不断发展,它将成为推动量子计算、人工智能和高级人机交互技术等领域的关键力量。这些技术的进步将使空天元宇宙能够处理更复杂的任务,提供更高效的数据分析和更真实的用户体验。然而,这也带来了量子计算机的稳定性和可扩展性问题,以及保障量子通信安全性和可靠性的挑战。此外,随着数据量的激增,如何有效地保护用户数据,防止数据泄露和滥用,将是一个持续的挑战。

在用户体验方面,通过虚拟现实和增强现实技术的发展,未来的空天元宇宙将提供更加真实和沉浸的用户体验。提高虚拟现实技术的真实感,减少用户的晕动症,以及提高用户界面的易用性和交互性,是提升用户体验的关键。同时,国际合作和标准化将是推动空天元宇宙发展的关键,特别是在标准化和互操作性方面。如何在不同国家和组织之间建立有效的合作机制和统一标准,以促进全球范围内的互操作性和协同工作,是一个重要的挑战。

## 5.3 解决建议

为了应对这些挑战,需要采取跨学科的研究和合作,特别是在量子科学、计算机科学和航天工程领域。通过集成不同学科的知识和技术,可以更有效地解决空天元宇宙面临的挑战。同时,投资于基础科学研究,特别是在量子技术和人机交互领域,是推动技术创新的关键,可以为空天元宇宙的发展提供坚实的科学基础。

与国际组织合作,制定空天元宇宙的国际标准,促进全球范围内的互操作性。通过建立统一的标准和协议,可以促进不同国家和组织之间的合作和数据共享。在追求技术创新的同时,重视风险评估和管理,确保技术的安全和可靠性。通过建立有效的风险管理机制,可以及时发现和解决技术发展中的潜在问题。

最后,提高公众对空天元宇宙的认识,通过教育和培训提升社会对新技术的接受度。公众的理解和支持是推动空天元宇宙发展的重要基础。这些方法可以确保空天元宇宙的发展既充满活力又可持续,为人类探索宇宙、提升生活质量和推动科

技进步提供无限可能。

## 5.4 结语

空天元宇宙的发展将开启人类探索宇宙的新篇章,它不仅将深刻影响航天科研和工业,还将改变人们的日常生活和工作方式。面对未来的挑战,我们需要不断创新,合作共赢,共同推动空天元宇宙向更广阔的未来迈进。

## 参考文献(References)

- [1] 孙伟伟, 杨刚, 陈超, et al. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析 [Z]//SUN W W, YANG G, CHEN C, et al. 遥感学报. Journal of Remote Sensing; Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites. 2020: 479-510
- [2] 窦江培, 朱永田, 任德清. 太阳系外行星的研究现状 [Z]//DOU J P, ZHU Y T, REN D Q. 自然杂志. Chinese Journal of Nature; Current research status of exoplanets. 2014: 124-8
- [3] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. *Physical review letters*, 2016, **116**(6): 061102.
- [4] GARRETT K, DUDA G. Dark matter: A primer [J]. *Advances in Astronomy*, 2011, **2011**: 1-22.
- [5] 刘子涵. 元宇宙:人类数字化生存的高级形态 [J]. 新阅读, 2021, (09): 78-9.
- [6] SALEH B E, TEICH M C. Fundamentals of photonics [M]. John Wiley & sons, 2019.
- [7] GOODMAN J W, DIAS A, WOODY L. Fully parallel, high-speed incoherent optical method for performing discrete Fourier transforms [J]. *Optics Letters*, 1978, **2**(1): 1-3.
- [8] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits [J]. *Nature Photonics*, 2017, **11**(7): 441-6.
- [9] LIN X, RIVENSON Y, YARDIMCI N T, et al. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks [J]. *Science*, 2018, **361**(6406): 1004-8.
- [10] FELDMANN J, YOUNGBLOOD N, WRIGHT C D, et al. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities [J]. *Nature*, 2019, **569** (7755): 208-14.
- [11] LUGT A V. Signal detection by complex spatial filtering [J]. *IEEE Transactions on information theory*, 1964, **10** (2): 139-45.
- [12] FARHAT N H, PSALTIS D, PRATA A, et al. Optical implementation of the Hopfield model [J]. *Applied optics*, 1985, **24**(10): 1469-75.
- [13] PSALTIS D, BRADY D, GU X-G, et al. Holography in artificial neural networks [J]. *Nature*, 1990, **343**(6256): 325-30.
- [14] LI H-Y S, QIAO Y, PSALTIS D. Optical network for real-time face recognition [J]. *Applied Optics*, 1993, **32** (26): 5026-35.
- [15] TAIT A N, DE LIMA T F, ZHOU E, et al. Neuromorphic photonic networks using silicon photonic weight banks [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 7430.



- [16] CHANG J, SITZMANN V, DUN X, *et al.* Hybrid optical-electronic convolutional neural networks with optimized diffractive optics for image classification [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 12324.
- [17] ZHOU T, LIN X, WU J, *et al.* Large-scale neuromorphic optoelectronic computing with a reconfigurable diffractive processing unit [J]. *Nature Photonics*, 2021, **15**(5): 367-73.
- [18] ASHTIANI F, GEERS A J, AFLATOUNI F. An on-chip photonic deep neural network for image classification [J]. *Nature*, 2022, **606**(7914): 501-6.
- [19] ZHANG Q, XU F, LI L, *et al.* Quantum information research in China [J]. *Quantum Science and Technology*, 2019, **4**(4): 040503.
- [20] ZHONG H-S, WANG H, DENG Y-H, *et al.* Quantum computational advantage using photons [J]. *Science*, 2020, **370**(6523): 1460-3.
- [21] 吴长锋. “祖冲之二号”实现超导体系“量子计算优越性”[N]. 2021-10-27.
- [22] CHOW J, DIAL O, GAMBETTA J. IBM Quantum breaks the 100-qubit processor barrier [J]. *IBM Research Blog*, 2021.
- [23] CHOI C Q. IBM's Quantum Leap: The Company Will Take Quantum Tech Past the 1,000-Qubit Mark in 2023 [J]. *IEEE Spectrum*, 2023, **60**(1): 46-7.
- [24] 周兵, 刘红军. 国外新兴商业低轨卫星通信星座发展述评 [Z]//ZHOU B, LIU H J. 电讯技术. Telecommunication Engineering; Development Review of Foreign Emerging Commercial LEO Satellite Communication SATCOM Constellations. 2018: 1108-14
- [25] 国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015-2025年) [J]. 卫星应用, **2015**, (11): 64-70.
- [26] 向开恒. 虹云工程技术验证系统 [M].
- [27] “行云工程”首发双星成功入轨 开启天基物联网建设 [J]. 金桥, 2020, (06): 15.
- [28] 蒙艳松, 边朗, 王瑛, *et al.* 基于“鸿雁”星座的全球导航增强系统 [Z]//MENG Y S, BIAN L, WANG Y, *et al.* 国际太空. Space International; Global Navigation Augmentation System Based on Hongyan Satellite Constellation. 2018: 20-7
- [29] 李建成. 从银河航天首发星在轨测试分析低轨宽带卫星通信的优势 [Z]//LI J C. 数字通信世界. Digital Communication World; Analysis on the Advantages of LEO Broadband Communication Satellites Based on the Ongoing Verifications of Galaxy Space First Satellite. 2021: 22-4
- [30] 方芳, 吴明阁. 全球低轨卫星星座发展研究 [J]. 飞航导弹, 2020, (05): 88-92+5.
- [31] HUANG J, CAO J. Recent development of commercial satellite communications systems; proceedings of the Artificial Intelligence in China: Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence in China, F, 2020 [C]. Springer.
- [32] 刘全, 葛新, 李健十, *et al.* 非静止轨道宽带通信星座频率轨道资源全球态势综述(上) [J]. 卫星与网络, 2020, (1): 66-9.
- [33] 苗青, 蒋照菁, 王闯. 下一代铯系统发展现状与分析 [Z]//MIAO Q, JIANG Z J, WANG C. 数字通信世界. Digital Communication World; Development Situation and Analysis of the Iridium Next System. 2019: 21-2+47
- [34] TOLKER-NIELSEN T, OPPENHAUSER G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX; proceedings of the Free-space laser communication technologies XIV, F, 2002 [C]. SPIE.
- [35] BOROSON D M, ROBINSON B S. The lunar laser communication demonstration; NASA's first step toward very high data rate support of science and exploration missions [J]. *The lunar atmosphere and dust environment explorer mission (LADEE)*, 2015: 115-28.
- [36] EDWARDS B, RANDAZZO T, BABU N, *et al.* Challenges, Lessons Learned, and Methodologies from the LCRD Optical Communication System AI&T; proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), F, 2022 [C]. IEEE.
- [37] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Temporary Laser Inter-Satellite Links in Free-Space Optical Satellite Networks [J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022, **3**: 1413-27.
- [38] CHEN Y-A, ZHANG Q, CHEN T-Y, *et al.* An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres [J]. *Nature*, 2021, **589**(7841): 214-9.
- [39] LI B, CAO Y, LI Y-H, *et al.* Quantum State Transfer over 1200 km Assisted by Prior Distributed Entanglement [J]. *Physical Review Letters*, 2022, **128**(17): 170501.
- [40] ANDERSON J D, WENDT J. Computational fluid dynamics [M]. Springer, 1995.
- [41] PRANDTL L, OSWATITSCH K, WIEGHARDT K. Führer durch die Strömungslehre [M]. Springer-Verlag, 2013.
- [42] 哈密尔顿系统的辛几何算法 [M].
- [43] 冷柏寒, 夏唐斌, 孙贺, *et al.* 面向可重构制造的数字孪生映射建模与监控仿真 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2022.
- [44] DAEMEN J, RIJMEN V. The Design of Rijndael: AES - The Advanced Encryption Standard [M]. The Design of Rijndael: AES - The Advanced Encryption Standard, 2002.
- [45] 高明. 浅谈对称加密算法与非对称加密算法的应用 [J]. 电子世界, 2015, (15): 2.
- [46] 靳丽君. 非对称加密体制中 RSA 算法的研究 [Z]//JIN L J. 电子设计工程. Electronic Design Engineering; System in the RSA asymmetric encryption algorithm. 2011: 29-30
- [47] JOHNSON D, MENEZES A, VANSTONE S. The elliptic curve digital signature algorithm (ECDSA) [J]. *International journal of information security*, 2001, **1**: 36-63.
- [48] DIESTEL R, SCHRIJVER A, SEYMOUR P. Graph theory [J]. *Oberwolfach Reports*, 2010, **7**(1): 521-80.
- [49] 乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, **24**(3): 209-12.
- [50] 苏晓琴, 郭光灿. 量子通信与量子计算 [Z]//SU X Q, GUO G C. 量子电子学报. Chinese Journal of Quantum Electronics; Quantum communication and quantum computation. 2004: 706-18
- [51] BRAGINSKY V B, BRAGINSKIĬ V B, KHALILI F Y. Quantum measurement [M]. Cambridge University Press,

- 1995.
- [52] 郭光灿, 张昊, 王琴. 量子信息技术发展概况 [Z]// GUO G C, ZHANG H, WANG Q. 南京邮电大学学报(自然科学版). Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition); Review on development of quantum information technology. 2017: 1–14.10.14132/j.cnki.1673–5439.2017.03.001
- [53] WILLIS M. Proportional–integral–derivative control [J]. *Dept of Chemical and Process Engineering University of Newcastle*, 1999, 6.
- [54] WOLF A, SWIFT J B, SWINNEY H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series [J]. *Physica D: nonlinear phenomena*, 1985, **16**(3): 285–317.
- [55] 元宇宙通证 [J]. 华东科技, 2022, (02): 44.
- [56] 陶飞, 张贺, 戚庆林, et al. 数字孪生模型构建理论及应用 [Z]//TAO F, ZHANG H, QI Q L, et al. 计算机集成制造系统. Computer Integrated Manufacturing Systems; Theory of digital twin modeling and its application. 2021: 1–15.10.13196/j.cims.2021.01.001
- [57] 王天枢, 林鹏, 董芳, et al. 空间激光通信技术发展现状及展望 [Z]//WANG T S, LIN P, DONG F, et al. 中国工程科学. Strategic Study of CAE; Progress and Prospect of Space Laser Communication Technology. 2020: 92–9
- [58] 付强, 姜会林, 王晓曼, et al. 空间激光通信研究现状及发展趋势 [Z]//FU Q, JIANG H L, WANG X M, et al. 中国光学. Chinese Optics; Research status and development trend of space laser communication. 2012: 116–25
- [59] 吴华, 王向斌, 潘建伟. 量子通信现状与展望 [Z]//WU H, WANG X B, PAN J W. 中国科学: 信息科学. Scientia Sinica (Informationis); Quantum communication: status and prospects. 2014: 296–311
- [60] 王晋岚. “墨子号”量子卫星圆满实现全部既定科学目标 [J]. 科学, 2017, **69**(05): 16.
- [61] 许娟. 量子通信的基本原理和研究进展 [Z]//XU J. 全国第十三次光纤通信暨第十四届集成光学学术会议. Fundamental and Research Progress of Quantum Communication. 2007: 703–7
- [62] 李赓. 量子通信技术研究现状 [J]. 电子元器件与信息技术, 2022, **6**(03): 111–3.
- [63] 刘涛, 朱聪, 孙春阳, et al. 不同天气条件对自由空间量子通信系统性能的影响 [Z]//LIU T, ZHU C, SUN C Y, et al. 光学学报. Acta Optica Sinica; Influences of Different Weather Conditions on Performance of Free-Space Quantum Communication System. 2020: 173–80
- [64] NIELSEN M A, CHUANG I. Quantum computation and quantum information [Z]//NIELSEN M A, CHUANG I. American Association of Physics Teachers. 2002
- [65] 吴楠, 宋方敏, XIANG-DONG L. 通用量子计算机: 理论、组成与实现 [Z]//WU N, SONG F M, LI X D. 计算机学报. Chinese Journal of Computers; Universal Quantum Computer: Theory, Organization and Implementation. 2016: 2429–45
- [66] 张威. 拥抱量子科技时代: 量子计算的现状与前景 [Z]//ZHANG W. 人民论坛·学术前沿. Frontiers; Embracing the Era of Quantum Technology: The Status Quo and Prospect of Quantum Computing. 2021: 64–75.10.16619/j.cnki.rmltxsqy.2021.07.007
- [67] VIDAL J J, OLCH R. Computer system architecture at the UCLA Brain Computer Interface Laboratory [M]//VIDAL J J, OLCH R. Computer Technology in Neurosciences. Hemisphere Publ. 1976: 411–38.
- [68] WILLETT F R, AVANSINO D T, HOCHBERG L R, et al. High-performance brain-to-text communication via handwriting [J]. *Nature*, 2021, **593**(7858): 249–54.
- [69] 《中国航天科技活动蓝皮书(2021年)》发布 [J]. 太空探索, 2022, (03): 5.
- [70] KARDASHEV N S. Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations [J]. *Soviet Astronomy*, Vol 8, p 217, 1964, **8**: 217.
- [71] 胡素芸, 邵斌澄, 李坤, et al. 面向航天员虚拟训练的人机交互系统研制和测试 [Z]//HU S Y, SHAO B C, LI K, et al. 电子测量与仪器学报. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation; Design and evaluation of a human-machine system for astronauts virtual training. 2017: 1902–11.10.13382/j.jemi.2017.12.004
- [72] 王洪福. Grover量子搜索算法理论研究 [D]; 哈尔滨工业大学, 2010.