

从数字月球到元月球

任曼^{1,2}, 刘建忠^{1,3*}, 王俊涛¹, 朱凯¹, 雷丹泓¹, 孙鹏举^{1,2}, 李雄耀^{1,3}

1. 中国科学院地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

摘要: 随着数字月球的建立与完善以及计算机与图像视觉高新技术的快速发展, 以大量遥感影像数据为基础的月球科学研究进一步走向深入, 为满足月球自形成演化至今的动态模拟和人类月球生存生产的场景体验需求, 建设元月球成为了月球科学研究中一项至关重要的任务。本文以数字月球为基础, 利用数字孪生、扩展现实等技术, 结合元月球自身特点和发展优势, 分析数字孪生、虚拟原生和虚实融生三个元月球发展阶段的需求和目标, 设计元月球的创造原则、运行规则、组织架构和服务模式, 针对认可程度较高的月球各阶段演化模型和未来生存生产活动, 构建了元月球的体系框架, 为月球科学研究提供新视角。

关键词: 数字月球; 元月球; 数字孪生; 扩展现实

中图分类号: P184 文章编号: 1007-2802(2023)01-0233-07 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.064

From digital Moon to Metamoon

REN Man^{1,2}, LIU Jian-zhong^{1,3*}, WANG Jun-tao¹, ZHU Kai¹, LEI Dan-hong¹, SUN Peng-ju^{1,2}, LI Xiong-yao^{1,3}

1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China;

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

3. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China

Abstract: With the establishment and improvement of the digital moon and the rapid development of high-tech computer and image vision, lunar scientific research based on a large number of remote sensing image data is further deepening. In order to meet the needs of dynamic simulation since the formation and evolution of the moon and the scene experience of human lunar survival and production, the construction of the metamoon has become a crucial task in lunar scientific research. In this paper, based on the digital moon, combined with the characteristics and development advantages of the metamoon, the technologies of digital twin and extended reality were used to have analyzed the needs and objectives of the three metamoon development stages of the digital twin, virtual native, and virtual and real fusion, and to have designed the creation principles, operation rules, organizational structure, and service mode of the metamoon. For the highly recognized evolution model of each stage of the moon and future survival and production activities, the system framework of the metamoon has been constructed, and a new perspective for lunar scientific research has been provided.

Key words: digital moon; metamoon; digital twin; extended reality

0 引言

数字月球的发展经历了概念提出、功能设计、技术研究、框架搭建和深化完善等一系列过程, 传统的数字月球注重月球空间信息的利用, 旨在实现

多种月球探测数据的融合与共享(喻贵银, 2006), 通过计算机网络实现月球信息服务, 是一项集深空探测、空间信息和计算机服务为一体的综合性科学技术(谭力, 2011; 李劼, 2012)。随着深空探测与新兴技术的发展, 过去的数字月球模式已不能满足当

收稿编号: 2022-109, 2022-6-2 收到, 2022-8-5 改回

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41941003); 民用航天预先研究重点项目(D020201); “921”关深项目(ZRYQYY00-JY-04-1.00); 中国地质调查局项目(DD20221645)

第一作者简介: 任曼(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 行星遥感。E-mail: renman@mail.gyig.ac.cn.

* 通信作者简介: 刘建忠(1968—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 行星地质学。E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn.

前的科学研究和工程应用需求,新一代数字月球云平台应运而生并不断发展完善。目前,基于大数据、云计算、虚拟现实等技术对月球科学数据的采集、存储、展示、共享功能已基本实现(孙鹏举等,2022)。新一代数字月球是集科学研究、工程实施和科普教育为一体,能够为科学研究和工程应用提供数据支撑和技术保障并将科学研究成果可视化的一个平台。具有数据密度大、功能体系完善、受众广、应用场景丰富等特点,满足了静态展示月球形貌特征、月球分阶段演化模型和月球科学研究成果的需求,解决了数据爆发式增长所带来的对数据存储管理、分析应用、传输共享的问题,用数字解读月球,为深层挖掘月球形成与演化的奥秘提供数据支撑,为我国未来的月球探测任务的规划和科学研究提供有力支持(孙鹏举等,2022)。

元宇宙(Metaverse)一词最早诞生于1992年尼尔·斯蒂芬森《雪崩》这一小说,主要描述使用者戴上耳机和目镜,通过找到连接终端,以虚拟分身的方式进入由计算机模拟、与真实世界平行的虚拟空间这样的情节(江玉琴和李艺敏,2022)。随着互联网与现实社会的加速融合,元宇宙以其独特的性质和优势被各界学者和企业家关注,其真实含义也随着参与者研究深度不断丰富(Ning et al., 2021)。事实上,如今的元宇宙更像是经典概念的重生,是在数字孪生、扩展现实、区块链和云计算等新技术下的概念具化(左鹏飞,2021)。“元”即超越之意,元宇宙可以理解为超越与突破自然宇宙的虚拟宇宙(蒲清平和向往,2022),是充分集成与融合现在与未来全部数字技术进行链接与创造,虚拟与现实高度互通,且由闭环经济体构造的开源平台(喻国明,2021)。当然,元宇宙并没有一个公认的定义,技术专家、经济学家和媒体人所给出的定义也都各有侧重(杨丹辉,2022)。基于此背景,结合数字月球和元宇宙的技术与特征,分析当前月球探测及研究领域的需求与难点,综合考虑用户体验的真实性和沉浸感,本文通过融合数字月球的数据优势及元宇宙的技术优势提出元月球概念。

本质上,数字月球是对月球现今状态的数字化表达,而元月球则是对月球形成演化过程,现今状态以及未来开发利用等过程在内进行虚实相结合的动态展示。元月球作为真实月球与虚拟月球的载体,主要利用网络通信、人工智能、数字孪生、扩展现实等技术,聚焦月球这一天然卫星,实现对月球形成演化及开发利用过程的数字化和虚拟化。可以说,元月球是数字月球发展到一定阶段,技术

与方法寻求新突破的必然产物,遵循科学数据标准及数据共享协议,秉承“存在即合理”原则,挣脱单一研究模式的束缚,力求通过全方位多角度的分析寻找一种最合适的能够解释月球形成与演化和其他发展规律的模型,科学动态化月球研究,挖掘月球的形成与演化历史,探讨月球开发利用的难度和可能性,追求真实月球生存与生产体验,对后续的科学研究和工程规划具有重要的指示意义。在元月球体系中,万物相连,以月球形成为研究起点,通过多种模型的交叉融合,寻找现今月球状态与演化历史间存在的联系,分析不同历史时期不同事件过程对现今月球产生的可能影响,差异化月球演化路径,最终形成现今表面布满撞击坑且毫无生命现象的月球。具体哪一种模型能够准确描述月球的形成、演化及发展,科学界争论不休,至今也没有一种完美的模型能够全面地解释月球自形成以来的演化路径和发展模式。按照元月球的理念,研究者不应从研究之初抛弃任何一种假说模型,而是经过具体模型组合并结合月球研究现状进行分析解释,逐步排除相对不合理的理论或猜想,最终获得一个当下最合理的结论模型。受研究深度、广度及月球探测手段和技术的限制与影响,当下对月球演化模型的认识仍处于不断更新与发展的过程中(邹永廖等,2016),虽然模型是始终发展变化的,但整个元月球体系的模式架构却不会随之改变。元月球聚焦月球形成与演化历史,打破未来月球生产生活的技术困局,构建交互感好、沉浸感强的虚拟现实系统,再现月球形成演化的时空规律,促进技术与科学研究的深度融合,实现月球科学与工程规划领域研究方法大变革,降低研究难度,提升工作效率。

1 元月球概述

1.1 元月球概念及特征

元月球(Metamoon)是基于数字孪生、扩展现实等技术对月球的起源、演化和开发利用等过程进行虚拟化、数字化,生成真实月球演化的镜像,提供月球生存场景的沉浸式体验,在基础设施、标准及协议共享的基础上,融合各类工具和平台,实现月球从形成到演化至今以及人类月球生存和生产动态过程的孪生场景和真实体验。

基于元月球基本概念,面向月球科学研究和工程任务的疑难点,元月球无疑给科学家和工程师们提供了一种解决问题的新思路。对于研究者而言,充分理解元月球理念有利于方法使用和问题解决,因此,明确元月球的特征性质是至关重要的。其特

征性质主要包括:①包容性,元月球体系允许各种猜想和假设并存,通过模型的交互组合最终得出最为理想的月球演化路径和发展模式;②时空性,元月球在关注目标时间维度变化的同时也关注其在空间维度的变化,做到时间与空间并重;③唯一性,月球演化路径存在多种可能,但演化的最终结果是唯一的,通过唯一不变的结果去检验模型存在的可能性,即为元月球的唯一性;④真实性,元月球中既有真实月球的数字化产物,也有虚拟月球中的用户创造物;⑤连接性(左鹏飞,2022),参考元宇宙连接模式,元月球把网络、虚拟月球、硬件终端和真实用户连接起来,构造出一个深融合、广覆盖的虚拟现实系统;⑥永续性,元月球不会暂停或停止,是以开源的方式运行并永久存续。元月球的性质决定了其在月球科学研究领域与众不同的地位,充分利用元月球能够有效保证研究的科学性,提升研究可信度,升华研究意义与价值。

1.2 元月球核心技术

元月球通过集成不同的数字新技术,为用户提供虚实结合的场景体验和真实感受,主要包含的核心技术有(图1):①扩展现实技术(Extended Reality,ER),是元月球核心技术中硬件技术的重要代表,通过构造虚拟场景服务,全方位、多角度地延伸使用者的整体感官,提供沉浸式体验,实现现实与虚拟的无缝转换(颜青山,2016),解决当前设备无法解决的问题;②数字孪生技术,利用物理模型、传感器、历史数据等,结合多学科、多尺度、多概率的

仿真过程(周瑜和刘春成,2018),将现实月球镜像到所建立的虚拟月球中,实现现实月球实体的多重分身;③网络及运算技术,主要解决计算量庞大问题,支持大量用户同时在线操作,提升数据处理效率,降低网络延时,实现高度同步(Hafner-Burton et al.,2009),使用户获得实时且流畅的元月球使用体验;④人工智能技术,是构建虚拟月球的强大支撑,通过统筹智能语音识别、机器学习、自然语言处理等技术(戴琼海,2021),让用户的数字分身能够在虚拟月球场景中与其他虚拟产物互动。深入元月球各层级、应用和场景,提升元月球的延展性和可编辑性;⑤物联网技术,满足多元化方式接入元月球需求,通过信息传感设备,实现物体与网络的互联互通(胡元军,2018),既承担了真实月球数据的前端采集和数字化职能,同时承担了虚拟月球渗透甚至管理真实月球的功能,使得用户随时随地以多种方式进入元月球体系。

综上所述,元月球包含扩展现实、数字孪生、网络及运算、人工智能以及物联网技术等在内的多项技术,通过技术的叠加融合、交互衍生,实现不同维度立体视觉、深度沉浸及虚拟分身等多项功能,把月球科学研究推向崭新的高度。

1.3 元月球发展阶段

为最大化元月球数字化、虚拟化的独特优势,从整体布局着眼,深入剖析其在技术及内容方面的先天优势,参考元宇宙发展阶段划分依据(沈阳,2022),根据技术发展模式和内容生产路线推断,元月球的构建与实现将经历数字孪生、虚拟原生和虚实融生三个阶段:①数字孪生阶段,将真实月球状态映射到虚拟月球中,形成与真实月球等价的虚拟数字化表达,让数字信息代替物理实体,最大化数字价值,元月球的数字孪生既脱胎于现实月球实体,又与现实月球场景相互作用;②虚拟原生阶段,即用户可在所创建的虚拟月球场景中进行编辑和再创造,按照用户思维自由生产模型产品,动态模拟月球形成及演化过程,体验月球生存与生产活动,所有产物皆属于虚拟月球世界的产物;③虚实融生阶段,打破虚拟月球与真实月球间的壁垒,用户在月球虚拟场景中的行为和创造物可以在真实月球上得以实现,无真正的虚实之分。

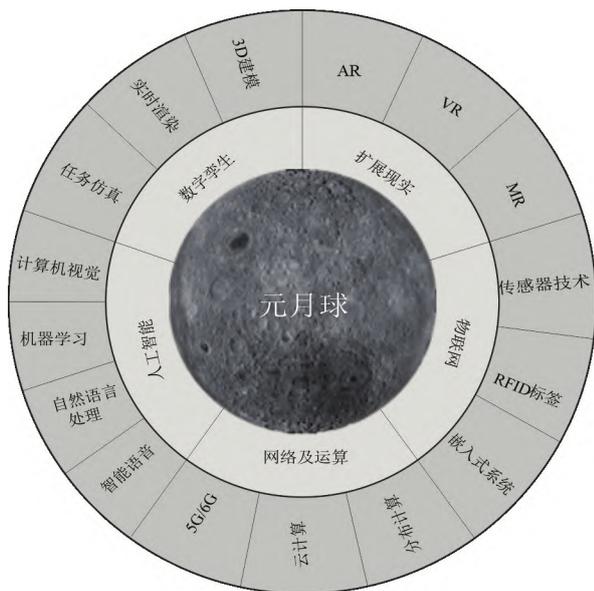


图1 元月球技术全景图

Fig. 1 The panorama of Metamoon technology

2 元月球运行框架

根据 Gartner 所发布的 2021 年新兴技术成熟度统计(张娟,2021),人工智能、数字孪生和扩展现实等与元月球相关的技术仍需要 5~10 年甚至更长时间

间才能发展成熟,技术生态与内容生态的不成熟使得元月球管理模式的构建更具挑战,要保证元月球持续且稳定的发展,应该秉承“开放包容、动态有序”的管理理念,初步设计元月球运行框架,针对元月球的创造原则、运行规则、组织架构和服务模式进行分析和详细设计,协同网络空间、硬件终端、实际用户,构建体系复杂,应用场景广泛的成熟系统。

2.1 创造原则

元月球建造完成,用户可根据实际需求和研究目标在月球虚拟场景中进行再创造,但二次创造需要遵循相应的创造原则:①不轻易否定原则,即对用户按照自身思维所创建的模型或任务持包容态度,不轻易给出否定意见;②遵循科学原则,指在虚拟月球中的创造物应遵循基本物理、化学、动力学及热力学规律,能够反映月球形成与演化的客观事实;③内容可实现原则,为满足元月球最终打破虚实壁垒的目标,帮助月球虚拟世界产物在现实月球项目研究中落地生根。

2.2 运行规则

同元宇宙一样(王明姬,2021),在元月球的发展与建立过程中,传统的生命概念、时空概念、运行机制等都可能改变,存在一定的风险,因此,为保障元月球的稳定运行,需要针对元月球制定单独的系统运行规则:①遵循底层逻辑,以人为主导,用户作为元月球的使用者和内容再创造者,承担着问题发现和使用体验反馈等职责,一定程度上决定了内容生产和管理模式的合理性,对元月球有着至关重要的作用;②多主体共创共治共享,元月球能够支持庞大的用户群体同时在线操作,在基础数据共享的前提下,参考全新的交互协议和数据标准,满足用户在虚拟月球世界中内容创造、问题治理及服务共享的需求;③统一技术连接通道,促进技术间深度融合,排除技术不互融所引起的系统不稳定或无法使用等问题,提升元月球运行效率和智慧化程度。

2.3 组织架构

元月球以五大核心技术为基础,在真实月球基础上,搭建起一个平行且持久存在的沉浸式虚拟月球空间,用户通过虚拟身份参与创造、研究、特色体验、生产生活等活动。完整严密的组织架构是保障元月球稳定持久运行的基础,其组织架构如图2所示。

(1)基础设施层:包括网络设施与硬件设施等(智能眼镜、脑机接口、手套、手柄等),随着网络通信、云计算、嵌入式AI、扩展现实等技术的发展成熟,虚拟环境中的实时更新和交互体验得到极大改

善,支持大规模用户同时在线,保证运行的超低延时,基础设施的发展与强化不仅是元月球实现的强大助力,同时为元月球与更多产业领域的结合提供可能。

(2)数据管理层:包含月球科学大数据及元月球生产数据,利用先进的数据管理方法,在有效存储数据的同时,充分挖掘数据既有价值,更好地服务元月球其他层级。

(3)运算处理层:是用户进入元月球的关键,主要包括边缘计算、实时渲染、语音与手势识别、机器学习、数字孪生技术等,让真实月球空间与虚拟月球世界无缝混合,实现两个空间的交互感知。

(4)应用服务层:元月球为用户提供科学研究、场景体验、工程建设、娱乐探索等模块服务,通过AI与用户协同合作,降低元月球内容创作门槛,提高数据质量,未来,元月球中内容生产将会步入AI辅助生产或纯AI生产阶段。

(5)扩展延伸层:基于初级元月球运行模式,结合新兴前沿技术发展态势,综合各领域成功方法案例,分析深空探测与月球科研的展望与需求,利用最新的探测分析数据弥补元月球可能存在的不足,增强系统使用体验感,巩固其在月球科学研究中的地位。

2.4 服务模式

元月球通过软硬件设备为用户提供共性服务,即“一站式”服务集成与支撑环境,实现数据与应用的充分共享和可重复使用,同时,算法、模型、工具、组件等的规范化服务,能够支持各类功能应用的快速开发和稳定运行,整体的服务模式如图3。

元月球的实现,是多个单项技术或服务集成组合的结果,服务提供方既可以是平台运营方,也可以是技术或业务提供的其他合作方,以底层资源(孪生媒介、数字人、渲染引擎、创作工具等)为基础,按照业务需求和目标,遵循一定的选择策略,根据服务功能组合机制与流程,创建组合服务的集成、开发与运行模式,通过已存在的共性服务,生成新的共性服务并投入运营,履行服务提供职能,满足用户对元月球的功能和应用需求。

3 元月球体系

元月球体系(图4)是以月球各演化阶段模型为基础,以数字模拟方法为手段,在基本运行规则的约束下,综合各技术发展现状与优势所建立的一体化月球形成演化及生产生活的模式架构。可以说,元月球体系是宏观的,也是微观的;是静态的,也是

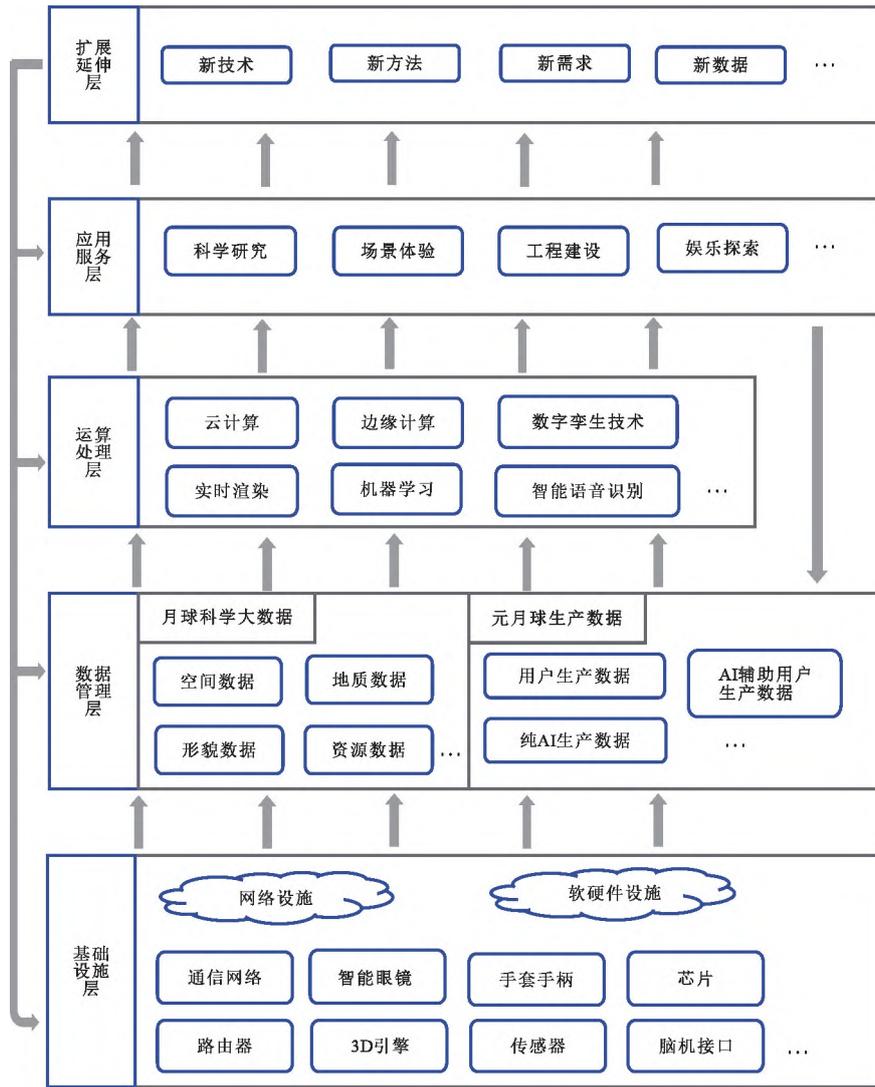


图 2 元月球组织架构图

Fig. 2 The organization chart of the metamoon

动态的;是可扩展的,也是不可更改的。

从宏观上看,元月球体系综合考量了月球演化各阶段的模型及特征,以月球形成为起点,在经历潮汐锁定、岩浆洋演化、各大撞击事件及后期太空风化等作用 and 改造后,形成如今的月球,并立足于月球形成演化及人类生产生活的大框架,指明元月球体系的发展方向。从微观上看,元月球体系中除了展示宏观演化阶段模型,如形成阶段的四种假说模型(双星吸积说、分裂说、大碰撞说、捕获说)、岩浆洋全熔或混熔状态模型及不同熔融层厚度(400~1000 km)模型等,也包含了模型微观特征,以 SPA 撞击模型为例,通过 iSale 模拟撞击结果,细微的参数改变都会影响模拟结果中所能观测到的撞击坑剖面形貌和残留物分布特点的变化(Yang et al., 2022),进而影响相应的撞击体速度、大小和撞击角度的推断结果。静态而言,元月球体系是相对静止

的,月球经历了约 45 亿年的演化时间,表面形貌已基本定型,内部的化学演化也已经停滞,因此,元月球体系中的月球仅是一个已经基本定形的,表面布满撞击坑且毫无生命迹象的静态月球;动态而言,用户在元月球体系中能够根据自己的主观意识或先验知识自由组合月球形成模式和演化路径,通过动态多变的模型组合寻找月球演化的真正奥秘。当然,元月球体系仍是不完备的、可扩展的体系,随着技术发展和研究深入,会产生新的月球演化模型或是通过新方法对现有模型展开修正,使得元月球体系中不仅包含有上图所列模型,更是囊括了未来月球形成演化模型及人类生存生产的无限可能,最后,需要指出元月球体系的运行框架是不可更改的,只有遵循一定的体系运行规则,才能保证用户获得稳定有序的服务体验。

月球自形成演变至今,经历了多次具有重大意

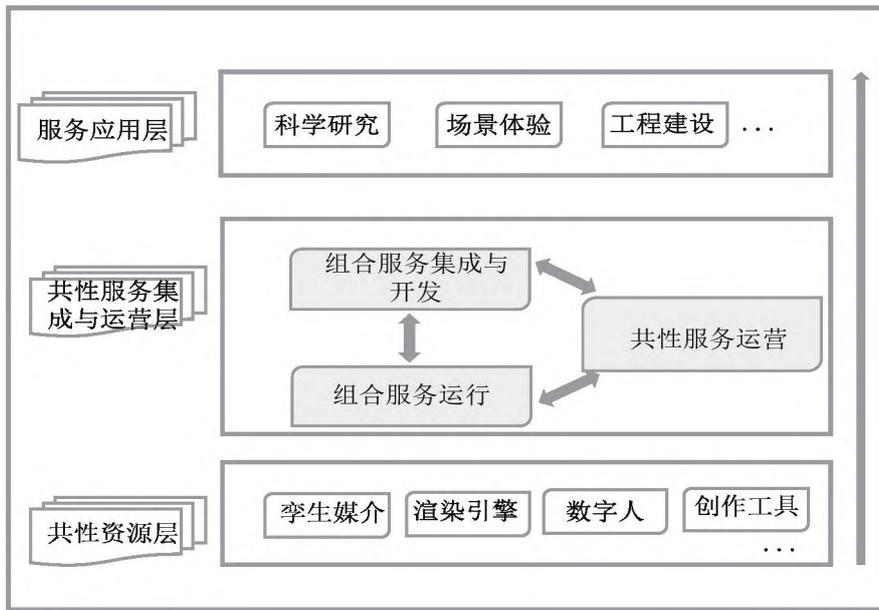


图3 元月球服务模式图

Fig.3 The service mode diagram of the metamoons

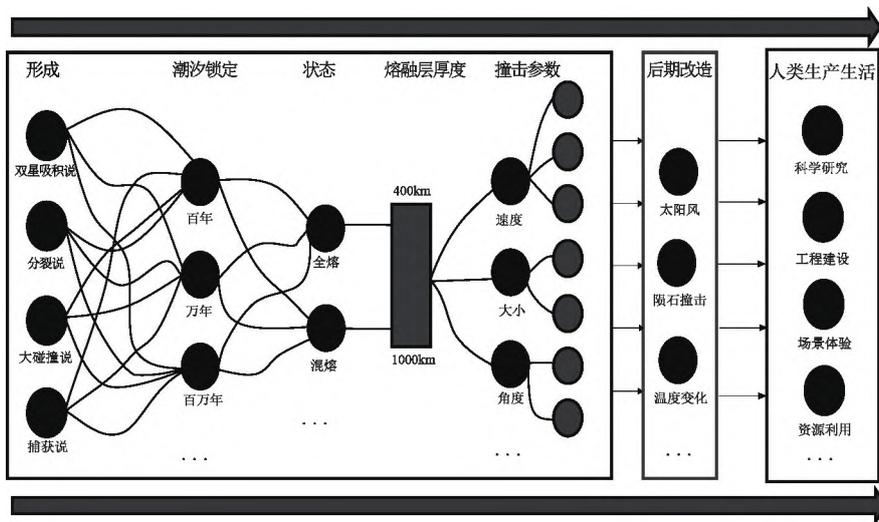


图4 元月球体系概念图

Fig.4 The concept diagram of the metamoons system

义的演化事件,每一阶段的内动力与外动力作用所带来的影响及内外动力的成因一直是科学家持续关注并深入探索的领域,通过建立元月球体系,进一步明确各个时期的演化模型,找到模型与模型间的内在联系,才能从根本上解开月球形成演化的谜团。尽管科学界存在一些认可度较高、相对较合理的模型,但元月球在处理这些模型时,需要去除模型已有的属性或认可程度,在不考虑外在因素和已有研究结果影响的基础上,充分发挥每一个模型的价值,摆脱现有研究的束缚,让所有模型在元月球体系中拥有平等地位,降低用户的使用门槛,使得元月球的使用更加便捷高效,这正是元月球这一理

念提出的意义与价值所在。

特别地,发射深空探测器、建立月球基地和开展各类月面科学实验已成为各个航天国家共同的目标,人类在月面上的生产与生存活动会成为未来月球改造的主要动力,元月球可以借助其强大的虚拟仿真能力,为人类活动提供丰富的沉浸式场景体验,通过用户反馈实时优化服务,提升人类月球活动的安全性与可靠性。

当然,元月球要想实现众多月球形成及演化模型的模拟,对软硬件设施及内置算法都有较高要求,本文所要建立的元月球体系正是在各种底层技术十分成熟的基础上,摆脱单一计算机的计算局

限,通过整合能够使用的所有网络空间和计算资源,在前期数字月球数据库相当完备的前提下,用动力学求解方法在线实时计算数以百万、千万乃至成亿的粒子,完成在元月球大环境中的月球形成过程模拟及模型建立。

总之,元月球体系包含广泛、不论对错,是科学家或工程师们研究月球或进行工程建设实验的有利工具,也是其他普通用户了解和学习月球知识的趣味平台,提升了用户的参与感和体验感,使得月球研究不再是某些专业人士的工作,更能够成为一种全民参与的探索新方式。

4 结束语

建成一个功能完善、数据齐全、模型质量优的数字月球平台是一个漫长且工作量巨大的任务,结合元宇宙概念的提出与发展,从数字月球出发,考虑月球实际演化过程和特征,提出了一种包容性更强、交互感更好的元月球理念,该理念的提出能够帮助科研工作者以一种全新的思维模式去审视月球整体演化规律和具体细节特征。从目前来看,元月球的实现确实存在技术方法和理念认同方面的问题,但元月球的价值和意义是不可否认的。以月球形成与演化为起点,通过不同的模型和假说对最终形成的月球现象进行解释,明确不同模型间的差异联系和存在问题,将静态理论模型动态实例化,寻找不同阶段最佳演化路径,就是元月球计划达到的目标。当然,真正实现元月球需要无数技术应用落地,目前,我们正处于元月球初期阶段,毫不夸张地说,元月球离我们还很远。

随着技术跨越式发展,人类社会对于新事物的接受能力也越来越高。尽管实现元月球还存在问题,需要攻克诸多难关,但正如前文所说,元月球是数字月球发展到一定阶段的必然产物。本文针对元月球的性质特征、核心技术和发展阶段进行分析,设计了元月球运行过程中的创造原则、运行规则、组织架构和服务模式,通过打破显示与物联网技术壁垒,将月球整体或局部的演化模型相互连接,寻找其内在变化与外在特征之间的关系,继而探索月球各阶段演化模型间的衔接程度,发掘月球演化过程中问题,为科学家提供新的研究模式与思路,同时,用户能够通过元月球获得月球生存与生产的真实体验,为进一步建设月球的生产与实验基地提供有效反馈。

本文所涉及的是与现阶段研究成果比较契合的假说和模型,并不完全正确,随着研究深入,可能

会产生新的模型,或是通过研究分析对旧模型进行修正,总之,经过模型与模型间的相互佐证以及新的探月数据或样本研究结果的证实能够逐步建立起一个相对意义上成熟度最高、最可靠的模型,从无到有,从基本错误到相对正确,这正是元月球的魅力所在。

参考文献 (References):

- Hafner-Burton E M, Kahler M, Montgomery A H. 2009. Network analysis for international relations. *International Organization*, 63(3): 559-592
- Ning H S, Wang H, Lin Y J, Wang W X, Dhelim S, Farha F, Ding J G, Daneshmand M. 2021. A survey on metaverse: The state-of-the-art, technologies, applications, and challenges. *arXiv preprint arXiv: 2111.09673*
- Yang Y Z, Li S, Zhu M H, Liu Y, Wu B, Du J, Fa W Z, Xu R, He Z P, Wang C, Xue B, Yang J F, Zou Y L. 2022. Impact remnants rich in carbonaceous chondrites detected on the Moon by the Chang'e-4 rover. *Nature Astronomy*, 6(2): 207-213
- 戴琼海. 2021. 人工智能未来——发现、理解与创造. *大数据时代*, (12): 20-27
- 胡元军. 2018. 浅谈物联网技术在生态环境监测中的应用. *科技资讯*, 16(30): 122-123
- 江玉琴, 李艺敏. 2022. “元宇宙”的空间变革与当代思考——兼论尼尔·斯蒂芬森的《雪崩》. *中国图书评论*, (4): 28-40
- 李劫. 2012. 数字月球平台共享数据文件格式研究与应用. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 蒲清平, 向往. 2022. 元宇宙及其对人类社会的影响与变革. *重庆大学学报(社会科学版)*, 1-12
- 沈阳. 2022. 元宇宙的大愿景. *青年记者*, (4): 1
- 孙鹏举, 刘建忠, 王俊涛, 雷丹泓, 任曼. 2022. 数字月球云平台设计. *矿物岩石地球化学通报*, 41(1): 135-142
- 谭力. 2011. 构建基于 G/S 模式的数字月球平台关键技术研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 王明姬. 2021. 冷静面对“元宇宙”热潮. *中国外资*, (24): 5
- 颜青山. 2016. 从虚拟现实到扩展现实: 哲学基础与伦理挑战. *人民论坛·学术前沿*, (24): 38-52
- 杨丹辉. 2022. 元宇宙热潮: 缘起、影响与展望. *人民论坛*, (7): 16-20
- 喻贵银. 2006. 画月——从月球测图到数字月球. *中国测绘*, (5): 26-29
- 喻国明. 2021. 未来媒介的进化逻辑: “人的连接”的迭代、重组与升维——从“场景时代”到“元宇宙”再到“心世界”的未来. *新闻界*, (10): 54-60
- 张娟. 2021. Gartner 发布 2021 年新兴技术成熟度曲线. *世界科技研究与发展*, 43(5): 510
- 周瑜, 刘春成. 2018. 雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新. *城市发展研究*, 25(10): 60-67
- 邹永廖, 郑永春, 陈建平, 丁孝忠, 林杨挺. 2016. 月球数字地质图编制与月球演化模型综合研究. *科技资讯*, 14(34): 249
- 左鹏飞. 2021-09-13(006). 最近大火的元宇宙到底是什么? *科技日报*
- 左鹏飞. 2022. 连接未来生活“元宇宙”会带来什么. *科学大观园*, (13): 40-41

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)