

数字月球云平台设计

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

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:随着月球探测与研究工作的深入以及行星科学一级学科的建设, 为满足进一步的工程实施、科学研究、科普教育的需求, 建设一个综合性的数字月球云平台成为我国月球科学发展中的一项重要任务。本文基于 B/S 架构, 结合各领域应用需求, 整合月球数据以及成果资源, 利用现有的云计算和大数据的管理、分析、挖掘等先进技术, 建设了月球科学数据体系和数据中心, 设计了具有工程应用、科学研究、科普教育等多个功能模块的综合性平台, 为我国月球科学的发展提供支撑。

关键词:数字月球; 云平台; 大数据; 框架设计

中图分类号: P184 文章编号: 1007-2802(2022)01-0135-08 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.098

Design of Digital Lunar Cloud-Based Platform

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

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

Abstract: With the development of lunar exploration, research and the construction of the primary discipline of planetary science, in order to meet the needs of further engineering implementation, scientific research and popular science education, building a comprehensive digital lunar cloud-based platform has become an important task for the development of lunar science. Based on the B/S architecture and combined with the application requirements of various fields, research aims to integrate available data and results of lunar science with advanced technologies such as cloud computing and managing, analyzing and mining of big data to build a lunar science data center and design a comprehensive lunar science software platform with multiple functional modules such as engineering application, scientific research and popular science education. This study will provide support for the development of lunar science in China.

Key words: digital moon; cloud-based platform; big data; framework design

0 引言

自 1958 年月球探测以来, 人类进行了 126 次月球探测活动(裴照宇等, 2020), 在后续的 46 次深空探测计划中月球探测任务占了 46%, 可见月球探测已成为 21 世纪国际深空探测竞争的主战场。2021 年中俄两国拟合作建设月球科研站(兰顺正, 2021)。2019 年美国公布了“阿尔特弥斯”重返月球及建立月球生存基地计划。频繁的月球探测活动

推动了探测数据(卫星遥感观测、就位探测等)呈 TB 甚至 PB 级爆炸式增长, 并呈现出多源异构、数据价值密度低等特点, 其采集、传输、存储、处理、共享、应用、分析挖掘和安全保障等环节面临巨大挑战(孟小峰和慈祥, 2013), 而探测数据的处理和应用水平深刻影响着月球科学的发展(刘继忠等, 2020)。

目前已有的月球数据平台总体上分为三类:
①月球探测工程配套数据系统。该系统侧重于探

收稿编号: 2021-126, 2021-8-2 收到, 2021-8-23 改回

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDY-SSW-DQC028); 中国科学院先导培育项目(XDPB11); 国家自然科学基金资助项目(41773065, 41941003)

第一作者简介: 孙鹏举(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 行星遥感. E-mail: pengjusun@yeah.net.

* 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.

测数据管理、发布共享、下载等功能,而缺少数据可视化,如中国探月工程数据发布系统、美国行星数据系统等;②成果数据可视化数据平台。该类平台关注影像数据的展示和浏览,不提供数据下载接口,主要有 QuickMap、WorldWind、GoogleMoon、Celestial 等;③专题数据成果集成和展示。这类平台具有数据查询、简单分析等功能,受众较单一,如我国月球地质数据管理系统。上述月球数据管理与发布系统功能单一,不具备有效支撑月面探测活动的任务设计、场景仿真、决策支持、科学研究等应用的能力,难以满足工程实施与科学研究的需求,建立解决以上需求的数字月球云平台系统是一项紧迫和必要的工作(余盼盼,2010;谭力,2011),可为其他行星科学数据管理与应用提供参考(邹自明等,2018)。

数字月球是利用大数据(王永志等,2018)、云计算(何文娜,2013)、虚拟现实等先进技术,实现对海量月球科学数据以及与月球相关地球系统科学数据的采集、存储、汇聚共享,并提供科学分析算法模型以及云计算服务。最终搭建集科学研究、工程实施、科普教育为一体的综合性数据应用和技术支撑平台,为进一步月球探测工程提供科学目标制定、着陆区和科研站选址、宇航员月面活动安全保障、科学探测、资源勘查及利用、科学实验模拟仿真和地面验证等支持以及为各个系统的论证工作提供空间定位、形貌、地质、资源、空间环境等方面的数据支撑,为月面探测任务实施的规划设计和模拟仿真等提供技术保障(Piechowski et al., 2020)。

1 数字月球的顶层设计

面向月球探测工程任务、月球科学研究及科普教育等需求,数字月球云平台顶层设计至关重要(图1),其主要建设目标包括五个方面:①建设数字月球云平台系统。开发数字月球系统原型,完成软硬件环境的搭建;②建设大数据中心。实现月球科学研究领域分散数据、模型、服务等的全集成;③开发科学研究模块。建设形貌月球、地质月球、资源月球、空间月球等专题数据库,并集成数据处理方法模型和部署云计算服务,为大数据驱动科学发现打下基础;④开发工程应用模块。包括着陆区选址模块和虚拟仿真模块等模块。利用平台科学数据,为着陆区选址、月面探测活动、月球基地建设提供场景仿真和技术支撑;⑤开发科普教育模块。包括月球科学、月球探测工程、深空探测的科普。

2 数字月球云平台软件架构

为满足平台设计需求,保证平台的先进性和扩展性,数字月球采用大数据管理、中心加节点的分布式服务方式,基于云计算运行管理技术,建设可以保障数字月球平台协调、高效运行的运行管理系统。平台总体分为弹性云基础设施层、大数据基础框架、数据中心系统、科学专题与综合应用(图2)(张建勋等,2010)。

弹性云基础设施层:硬件系统、软件和网络基础设施,为数字月球云平台提供软硬件支撑环境。平台采用华为云的设备以及技术进行部署,私有云

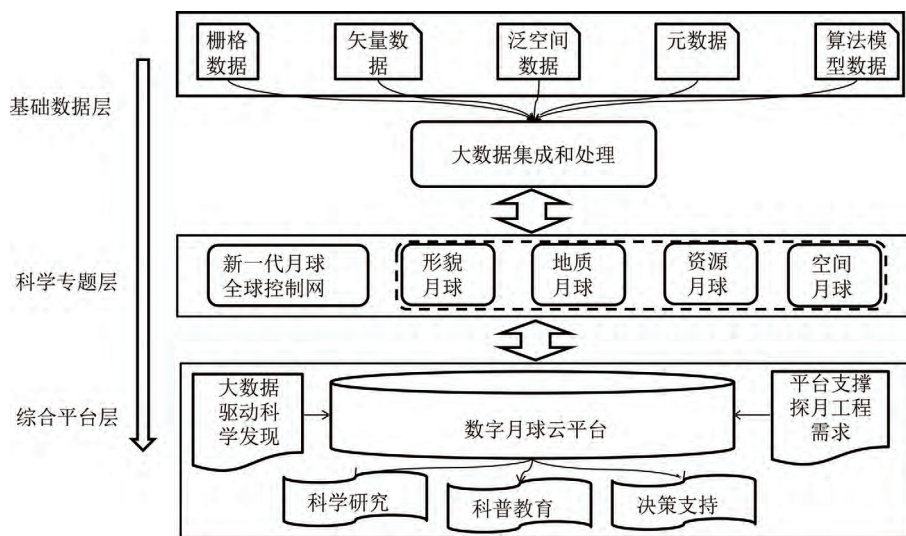


图1 数字月球云平台的顶层设计

Fig. 1 The top-level design of the Digital Moon cloud platform

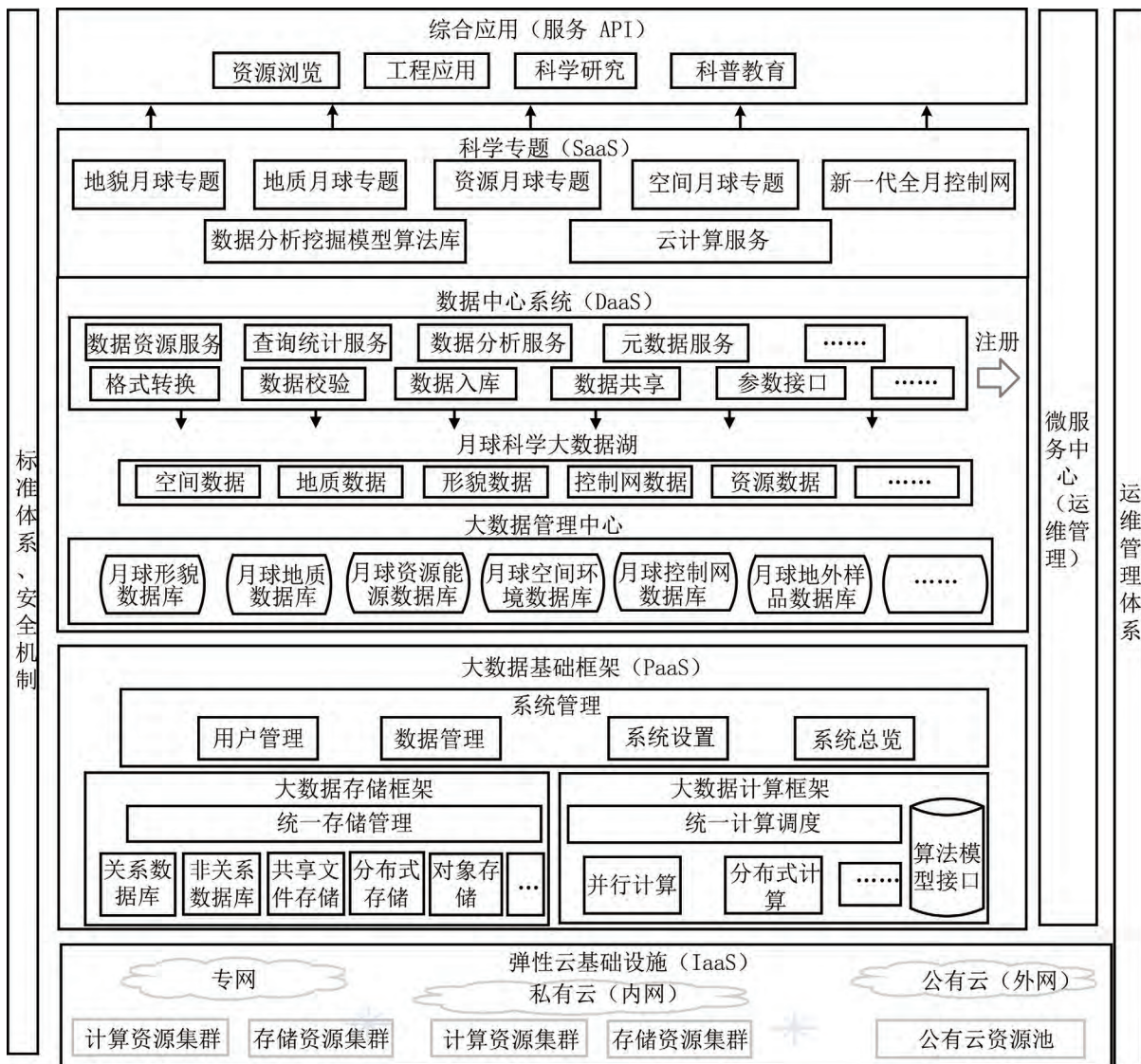


图2 数字月球云平台的总体设计

Fig. 2 The overall design of the Digital Moon cloud platform

的主要硬件设置包括存储模块、网络模块、计算模块等(武志学,2017)。

大数据基础框架:大数据存储框架提供多源异构数据存储管理能力,以月球数据中台和月球业务中台为核心,由大数据计算框架提供大数据分析、挖掘的计算能力,可对平台资源进行监控管理、调度及弹性分配。

数据中心系统:完成对遥感探测数据、地质数据、形貌数据、能源数据、空间环境数据、地月系统数据、地外样品数据和新一代控制网等时空数据的存储管理、融合治理和挖掘分析。

综合应用和科学专题:访问平台中各类月球的计算服务、数据服务接口,构成实现工程应用、科学研究、科普教育和多源数据管理的综合应用。

3 数字月球云平台功能设计

数字月球云平台旨在为广大用户提供一个支撑工程、科研、科普的大平台,是依用户类型灵活提供相应功能模块。数据资源模块主要有数据浏览、查询检索等,科学研究包括专题分析、算法模型、数据挖掘和科研态势感知等,综合应用含有着陆区选址、虚拟仿真等,系统管理包括用户管理、数据管理、系统设置、系统总览(图3)。

3.1 资源浏览

目前世界各国月球探测数据累计已超过1000TB,多数原始探测数据和成果数据已发布共享。这为数据中心建设提供了可能。数字月球云平台收集了各国的主要月球基础探测数据(表1),大量的成果数据,包括各种分辨率的全月拼接影

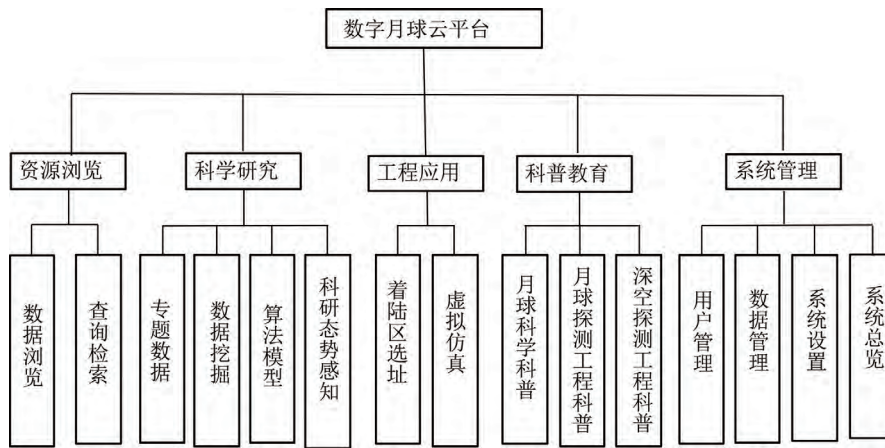


图3 数字月球云平台的功能结构图

Fig. 3 The functional structure diagram of the Digital Moon cloud platform

像、数字高程模型、矿物元素的全月分布图、全月的重力、磁场分布数据、月亮亮温数据、各类月表构造形迹的分布数据等各类栅格矢量图、基于月球样品测得的月球物质成分的光谱数据、月球的陨石数据库以及陨石的研究成果、文献期刊、书籍、多媒体科普资料等,数据的总量达1000TB。

大数据中心还建立了月球数据存储与管理的规范与格式标准(李晨帆等,2021)。目前各国月球科学数据的组织与归档均采用NASA行星数据系统(PDS)为标准。大数据中心建设的数据格式是基于PDS4开发的,为多国遥感探测数据规范化和标准化奠定基础(李劼,2012)。

大数据平台包括原始数据库、过程数据库、成果数据库。各数据库根据数据逻辑需要包含多个子数据库,各子数据库由空间数据和非空间数据组成。其中,空间数据主要包括栅格数据、矢量数据以及少量其他空间数据,非空间数据主要包括记录数据的属性和信息的元数据和月球相关的音视频、样品数据等。

数据浏览是采用“一张图”理念,将月球科学的栅格数据、矢量数据分层展示,用户可自由浏览感兴趣区域和图层。

查询检索可通过目标区域的经纬度、地名、分辨率等条件进行,交互式划定范围进行。

表1 主要月球探测数据

Table 1 Major data of lunar exploration

数据类型	探测任务	主要载荷	分辨率	范围
影像数据	LRO	NAC	0.5~2.5 m	全月
	LRO	WAC	100 m	全月
	KAGUYA	TC	10 m	南北纬70度间
	CE1	CCD	120 m	全月
	CE2	CCD	7m	全月
	CE3	TCAM\PCAM	0.01 m-	着陆区、巡视区
激光高度数据	LRO	LOLA	dem:30 m	全月
	CE1	LAM	dem:120 m	全月
	CE2	LAM	dem:20 m	全月
γ射线谱仪数据	LP	GRS	2 d	全月
	CE2	GRS	1 d	局部
光谱数据	LRO	DIVINER	128 ppd	全月
	CHANDRAYAAN-1	M3	140 m	全月
	CLEMENTINE	UVVIS	200 m	全月
	KAGUYA	MI	20m	全月中低纬
成像干涉谱仪数据	CE1	IIM	26 m	局部
雷达数据	LRO	MINI-RF	128 ppd	全月
重力数据	GRAIL	LGRS	1200 a	全月

3.2 科学研究

为广大科学工作者提供科研支撑是数字月球云平台设计的重要目标之一。科学研究模块包括专题研究、算法模型、数据挖掘、科研态势感知四个部分。

3.2.1 专题研究 科学专题研究分为全月新一代控制网、形貌月球、地质月球、资源月球、空间月球五个科学专题,以此分类型为不同的科学研究提供数据与算力支持。

(1)新一代全月控制网:国际上现有的月球控制网不能满足现在工程的计划需求,需要更高精度的月球控制网数据(刘建军等,2015)。我国嫦娥系列数据和美国月球侦察轨道器窄角相机数据提供的高分辨率影像为此提供了基础。利用多源月球影像几何建模和构网,与激光测高数据进行联合平差,构建百米量级的新一代月球全球控制网,建立精度优于100米,不少于100万个控制点的月球全球控制网数据库,可为我国月球探测进一步发展提供工程支撑(邸凯昌等,2018)。

(2)形貌月球:月球形貌在研究月球演化机理、月球探测工程和未来月球科研站的建设方面有着重要意义。形貌月球将利用高分辨率月球影像自动化几何处理技术以完成全月优于3m分辨率的月表影像的拼接,以此进行月表100m撞击坑的提取,从月球地质演化过程、表面形态特征及营力作用方式等角度出发,确定分类体系指标、明确指标划分标准,构建形态与成因相统一的月球形貌分类体系,编制典型区域多尺度的月貌图(程维明等,2018;何文娜等,2019)。

(3)地质月球:月球地质是月球科学研究的主要战场,月球形成演化历史(欧阳自远和刘建忠,2014)、岩石矿物成分和构造形迹的演化机制是地质月球的重要内容。地质月球专题将开展地质图编研的关键技术和科学问题研究(郭弟均等,2014),通过对岩浆洋盖层演化模型、月球超级撞击盆地形成和撞击效应的模拟,进而最大限度地集成和表达国内外最新月球地质科学的研究成果,建立月球地质图及专题图编制的标准和规范。基于嫦娥二号和月球勘测轨道器的影像数据(刘建忠等,2013),利用最新的月球科学研究成果和1:250万的全月地质图(许可娟,2020),可采用GIS的地图制图或智能编图方法(何文娜等,2020),完成南北纬32°间1:100万、典型区域的1:25万和1:10万的月球数字地质系列图编制,为载人月球探测及月球科研站建设提供参考资料。

(4)资源月球:对月球进行研究的最终目标是科学合理利用月球(欧阳自远等,2002),精确分析与反演月球资源含量、制作各种元素含量分布图、评估月球资源总量综合利用月球的前提(李琛等,2020)。通过提升反演精度以突破复杂地形下的元素含量反演技术,进行高分辨率的Fe、Ti等元素含量反演,联合多源雷达数据,研究改进信号降噪的处理技术,提高月球氦-3资源评估的精度;联合中子谱仪数据和高光谱数据,开发多探测手段联合技术,进行月球水资源的确认和评估(王超等,2020)。资源月球将生产系列比现在更高精度的月球元素的反演数据,对月球资源勘察的规范总则展开研究,为月球着陆区选址、未来的月球科研站的建设提供技术支撑。

(5)空间月球:月球的空间环境特征月球科学问题研究的重点内容,也是我们月球探测任务安全实施的关键因素(王赤等,2019)。空间月球专题将开展复杂地形的月表光照条件的高精度仿真、可视化等算法及软件开发,开展月球尘埃亚微米颗粒的自动识别技术与月球尘埃环境的研究,为宇航员的生命健康(齐玢等,2016)、航天器的性能以及宇航服的设计提供保障(陈磊等,2010);空间月球专题还将开展月球等离子体参数离散实测数据的全空间插值、补全技术与月球等离子体环境研究,以及太阳高能粒子能谱重建技术与月球高能粒子辐射环境研究。

3.2.2 算法模型 算法模型拟建成月球数据处理方法最全的方法库,包括影像、光谱、重力、能谱、地震、雷达、空间环境等系列数据处理方法及数值模拟理论模型。针对数据库中不同类月球科学数据,对其处理方法进行收集整理。部署常用的数据处理方法与模型(如一些经典的识别和反演模型)、基于数据挖掘和深度学习的算法模型(邸凯昌,2021),以建成世界上最全的月球数据研究算法集,为数字月球平台的用户提供优良的算法模型服务。

3.2.3 数据挖掘 数字月球的最终目标是用户能够使用数字月球平台的数据、算法、算力进行科学研究。基于云计算技术开发、配置和调用数字月球云平台中的数据与算法,为用户提供按需计算服务,以完成普通浏览、科学研究与实验等应用需求(李玉琼等,2017)。

3.2.4 科研态势感知 月球研究关注许多重大的科学问题,例如月球形成的大碰撞、岩浆演化、小天体撞击、地月系统相互作用及其效应等核心科学问题(肖龙,2016;惠鹤九,2017)。传统地学分析方法

有一定的局限性,在月球科学领域运用大数据驱动科学发现的第四科研范式,开展月球科学时空大数据的分析和挖掘,可为月球核心问题解决提供新方法、新思路(张旗和周永章,2017)。

以期刊文献作为数据源,该模块基于自然语言处理技术和图谱技术进行分析,以期刊文献的词频信息、上下文关系动态显示不同年代的月表研究的热点区域和热点变化,可挖掘月球构造形迹等要素隐含的关系,为用户了解月球科学研究与探索历程、预测研究动态和方向提供参考。

3.3 工程应用

数字月球平台紧密结合我国月球探测的发展规划需求,面向探月工程的实际应用,主要设计了着陆区选址、虚拟仿真等应用模块。

3.3.1 着陆区选址 着陆探测是月球探测的重要阶段,目前探测任务和探测目标开始瞄准定点和定量的解决月球的根本性问题(肖龙,2016;Flahaut et al., 2019),例如布置月震设施来探索月球内部的结构;在不同的区域采样返回修正撞击坑大小频率统计定年的曲线等。我国探月工程嫦娥三号、嫦娥四号、嫦娥五号都成功在月球表面着陆,后续的探测任务很大概率会再次着陆探测,未来无人探月和载人探月的着陆位置选择均是我国月球探测工程应用的重要内容。着陆选址不仅关系到科学研究的价值以及国家层面的战略意义,更关系到整个探测任务的成败。着陆区选址的目标是通过合理综合利用现有的数据和算法,先对工程实施条件(如地形、光照、通讯条件等)和月球的科学研究价值等条件指标进行量化,对多个参数设置和计算完成筛选,选择具有科学研究价值和工程安全实施能力的区域作为预选的着陆区域,为月球探测的工程实施打下坚实的基础(张焯等,2020)。着陆区选址模块利用已有数据,采用决策树等算法模型进行计算。在选址时,先考虑影响月表工程实施的环境约束,结合现有技术的工程能力,选取月表坡度、粗糙度、石块丰度光照以及月面亮温等科研成果数据,使用证据权重法求解各个图层的权重指标,设置卷积窗口以及步长,对全月范围的上述栅格数据进行卷积运算,通过阈值设定完成初步筛选,将得到符合工程能力的区域,再对其再进行科学约束。针对不同探测任务的科学目标,考虑线性构造、特殊地质现象的分布以及重点关注的科学问题等,通过变量调整、权重设定进行计算,可得到区域不同网格内的加权得分。根据得分情况、未来资源利用、基地建设和感兴趣矿物元素,可得到符合条件的最终区

域,并自动生成详细的选址报告。

3.3.2 虚拟仿真 虚拟现实技术在智能制造、医学、实验教学等方面取得良好的反响(贺占魁和黄涛,2018)。通过建立高仿真度的虚拟环境和虚拟物体,使参与者能跨越空间限制,以沉浸式的体验进入虚拟场景,从场景内获得新的感性和理性的认识(刘振东等,2017)。在数字月球平台中,将虚拟仿真技术融入航天员训练、月表探测、月球采样等场景,可让普通用户亦能感受到探月工作的复杂、行星探测魅力、科技含量高等特点,特别对航天员场景适应和任务流程操练提供工程支撑(Chen et al., 2013)。

3.4 科普教育

开展月球与行星科学的科普教育,可激发高校、科研院所、科学共同体等多元主体参与深空探测的活力,激发全民关注月球与行星科学的发展,提升国民科技素质,为领域的发展培养后续的力量(魏勇,2021)。

3.4.1 月球科学科普 月球科学科普将使全民“零距离”触摸月球成为可能。平台定期更新月球研究进展的科普文章,将月球的科研成果以各种多媒体方式可视化,针对月球表面构造形迹、嫦娥工程着陆区和月表典型区域等采用三维展示,能激发广大民众和青少年对科学探索的热情,提高全民的科学素养,为月球与行星科学的发展培养后备力量。

3.4.2 月球探测工程科普 月球探测工程的历史过程是了解月球数据和月球科学问题的重要方式。美国、前苏联、日本、欧空局、印度、中国等进行了一系列的月球探测任务,按照探测的时间顺序对各个月球探测工程进行科普,即对各自探测科学目标、探测载荷、科学数据、科研成果等资料以科普文章、科普视频、虚拟仿真模型等方式展示,有利于大众了解月球探测历史及科学问题。

3.4.3 深空探测科普 对月球的研究是人类走向深空的跳板,世界各国已经开展对火星、水星等行星的探测任务。我国于2020年由“天问一号”执行中国首次火星探测任务,未来将开展小行星采样返回探测、火星采样返回探测、木星系及行星际穿越等一系列深空探测活动(吴伟仁等,2019)。深空探测科普通过对各深空探测任务介绍、探测虚拟仿真模型等方式普及深空探测的工程和科学问题。

3.5 系统管理

为保证平台安全稳定的运行,平台的系统管理模块包括用户管理、数据管理、系统设置、系统总览等四个部分。

3.5.1 用户管理 数字月球云平台对不同需求的用户设置了不同的用户权限。用户分为管理员、普通用户、科研用户和工程用户。

3.5.2 数据管理 数据管理主要完成月球数据的采集和更新,包括各种月球相关数据的注册、更新、修改和删除。

3.5.3 系统设置 系统设置用来完成平台上功能与服务的发布、属性修改以及删除,保证平台更新和稳定运行。

3.5.4 系统总览 平台数据情况、功能运行概况等以可视化形式进行展示,可为合理调度平台资源提供支撑,主要包括数据概要、平台访问统计、功能使用情况等。

4 结束语

随着我国的探月计划的进一步实施,为了充分挖掘各国现有的月球探测数据,弥补月球科学研究相对于探测的滞后,促进新的研究范式在行星科学的落地生根,本文从月球科学数据出发,针对月球数据离散的现状以及目前月球各个数据系统的局限性,紧密结合我国的月球科学的研究现状与深空探测的工程实施进程,设计了数字月球云平台。

(1)设计了数字月球云平台的总体架构:通过对弹性云基础设施层、大数据基础框架、数据中心系统、科学专题与综合应用等模块的设计,为月球数据的收集、汇聚、存储、共享以及综合应用提供了可实施的解决方案。

(2)提出月球科学大数据中心建设框架:规划了月球探测数据规范化和标准化要求,提出并建立了完整的月球数据体系、数据管理及服务模式与方法。

(3)设计了按需服务的数字月球云平台的功能模块:根据不同用户、不同权限、不同应用需求(如工程、科研等),设计了数字月球软件功能蓝图。

数字月球平台建设将在本文提出的设计基础上,详细设计数据模型、功能实现流程,并采用先进的软件研发方法,基于企业级程序设计语言、人工智能等技术,编程实现数字月球平台的软件服务系统,让数字月球云平台对月球科学事业发展做出卓越的贡献。

致谢:感谢新兴华安智慧科技有限公司提供的技术支持。

参考文献 (References):

- Chen M, Lin H, Wen Y N, He L, Hu M Y. 2013. Construction of a virtual lunar environment platform. *International Journal of Digital Earth*, 6(5): 469-482
- Flahaut J, Carpenter J, Williams J P, Anand M, Crawford I A, Van Westrenen W, Furi E, Xiao L, Zhao S. 2019. Regions of interest (ROI) for future exploration missions to the lunar South Pole. *Planetary and Space Science*, 180: 104750
- Piechowski S, Pustowalow W, Arz M, Rittweger J, Mulder E, Wolf O T, Johannes B, Jordan J. 2020. Virtual reality as training aid for manual spacecraft docking. *Acta Astronautica*, 177: 731-736
- 陈磊, 李飞, 任德鹏, 蔡震波. 2010. 月面和近月空间环境及其影响. *航天器工程*, 19(5): 76-81
- 程维明, 刘楠漪, 王娇, 高文信, 刘建忠. 2018. 全月球形貌类型分类方法初探. *地球科学进展*, 33(9): 885-897
- 邱凯昌, 刘斌, 彭嫚, 辛鑫, 贾萌娜, 左维, 平劲松, 吴波, Jürgen O. 2018. 利用多探测任务数据建立新一代月球全球控制网的方案与关键技术. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(12): 2099-2105
- 邱凯昌, 叶乐佳, 王润之, 王晔昕. 2021. 行星遥感影像目标识别与分类进展. *遥感学报*, 25(1): 365-380
- 郭弟均, 刘建忠, 张莉, 籍进柱, 刘敬稳, 王梁. 2014. 月球地质年代学研究方法及月面历史划分. *地学前缘*, 21(6): 45-61
- 何文娜. 2013. 大数据时代基于物联网和云计算的地质信息化研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学
- 何文娜, 朱长青, 王永志, 李仰春, 孙仁斌, 陈圆圆, 蒋作瑞. 2019. 智绘地质——一种基于 MapGIS 的地质编图智能化系统. *地球物理学进展*, 34(5): 2030-2036
- 何文娜, 朱长青, 李仰春, 陈圆圆, 孙仁斌. 2020. 基于 ArcGIS 的智能地质图综合. *地球物理学进展*, 35(2): 728-734
- 贺占魁, 黄涛. 2018. 虚拟仿真实验教学项目建设探索. *实验技术与管理*, 35(2): 108-111, 116
- 惠鹤九. 2017. 月球内部水的研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 36(5): 706-713
- 兰顺正. 2021. 中俄签署备忘录, 合力推进月球开发. *世界知识*, (8): 62-63
- 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
- 李晨帆, 姚佩雯, 刘翔, 陈冰玉, 邹鸿博, 王彪, 张江, 李勃, 凌宗成, 陈圣波. 2021. 面向中国深空探测任务的行星数据系统的设计与实现. *遥感学报*, 25(2): 599-613
- 李玉琼, 杜雪亮, 马蓁, 王金荣. 2017. 全球大陆裂谷玄武岩数据挖掘的初步结果. *矿物岩石地球化学通报*, 36(6): 912-919
- 李琛, 魏奎先, 李阳, 马文会, 赵斯哲. 2020. 月球表面矿产资源原位利用研究进展. *中南大学学报(自然科学版)*, 51(12): 3289-3299
- 刘建军, 任鑫, 王奋飞, 牟伶俐, 王文睿, 谭旭. 2015. 月球光学遥感与制图研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 461-470
- 刘建忠, 欧阳自远, 李春来, 邹永廖. 2013. 中国月球探测进展(2001-2010年). *矿物岩石地球化学通报*, 32(5): 544-551
- 刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 康焱, 李晖, 马继楠, 陆希. 2020. 深空探测发展战略研究. *中国科学: 技术科学*, 50(9): 1126-1139

- 刘振东, 李晓东, 马建民, 曲本全. 2017. 虚拟仿真技术在工程训练中的应用. 实验室研究与探索, 36(3): 160-163
- 孟小峰, 慈祥. 2013. 大数据管理: 概念、技术与挑战. 计算机研究与发展, 50(1): 146-169
- 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 刘建忠. 2002. 月球某些资源的开发利用前景. 地球科学—中国地质大学学报, 27(5): 498-503
- 欧阳自远, 刘建忠. 2014. 月球形成演化与月球地质图编研. 地学前缘, 21(6): 1-6
- 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 康焱, 邹永廖, 张焯, 张玉花, 贺怀宇, 王琼, 杨瑞洪, 王伟, 马继楠. 2020. 月球探测进展与国际月球科研站. 科学通报, 65(24): 2577-2586
- 齐玢, 果琳丽, 张志贤, 李志杰, 闻佳, 叶培建. 2016. 载人深空探测任务航天医学工程问题研究. 航天器环境工程, 33(1): 21-27
- 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
- 王赤, 张贤国, 徐欣锋, 孙越强. 2019. 中国月球及深空空间环境探测. 深空探测学报, 6(2): 105-118
- 王超, 张晓静, 姚伟. 2020. 月球极区水冰资源原位开发利用研究进展. 深空探测学报, 7(3): 241-247
- 王永志, 金樑, 朱月琴, 白明, 包晓栋. 2018. 基于大数据技术的地学文档关键词提取算法研发. 地球物理学进展, 33(3): 1274-1281
- 魏勇. 2021. 国家需求在行星科学一级学科建设中的导向作用. 地球与行星物理论评, 52(4): 353-355
- 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 于登云, 于国斌, 张哲. 2019. 中国探月工程. 深空探测学报, 6(5): 405-416
- 武志学. 2017. 云计算虚拟化技术的发展与趋势. 计算机应用, 37(4): 915-923
- 肖龙, 乔乐, 肖智勇, 黄倩, 何琦, 赵健楠, 薛竹青, 黄俊. 2016. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及着陆区选址建议. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 46(2): -029602
- 许可娟, 王梁, 韩坤英, 丁孝忠, 王丹, 凌宗成, 庞健峰, 王颖. 2020. 1:250 万月球地质图符号库的设计与实现. 地球科学, 45(7): 2650-2661
- 余盼盼. 2010. 月球空间数据共享发布技术研究. 硕士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学
- 张焯, 杜宇, 李飞, 张弘, 马继楠, 盛丽艳, 吴克. 2020. 月球南极探测着陆工程选址建议. 深空探测学报, 7(3): 232-240
- 张建勋, 古志民, 郑超. 2010. 云计算研究进展综述. 计算机应用研究, 27(2): 429-433
- 张旗, 周永章. 2017. 大数据时代对科学研究方法的反思——《矿物岩石地球化学通报》2017 大数据专辑代序. 矿物岩石地球化学通报, 36(6): 881-885
- 邹自明, 胡晓彦, 熊森林. 2018. 空间科学大数据的机遇与挑战. 中国科学院院刊, 33(8): 877-883

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:肖保华)