

GUAN Feng, GE Ping, LIU Shuangliang, MA Ke, JIANG Yichen, LI Xiang, XU Yanli, SHAO Yanli, KANG Yan, LIU Jizhong. Concept and Framework Development of the Digital-Intelligent Solar System (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(5): 1149–1162. CSTR:32142.14.cjss.2025–yg06. DOI:10.11728/cjss2025.05.2025–yg06

# 数智太阳系概念及构建方案探索\*

关 锋<sup>1,2</sup> 葛 平<sup>1,2</sup> 刘双良<sup>1</sup> 马 克<sup>1</sup>  
姜亦宸<sup>1</sup> 李 响<sup>1</sup> 徐艳丽<sup>1</sup>  
邵艳利<sup>1</sup> 康 焱<sup>1,2</sup> 刘继忠<sup>1,2</sup>

1(深空探测实验室 北京 100195)

2(探月与航天工程中心 北京 100041)

**摘 要** 人类对太阳系的探索逐渐向更强学科耦合度、更高任务复杂性、更广泛国际合作的新阶段转变, 以大数据、人工智能、大计算为典型特征的“人工智能+”正在重塑深空探测的实践模式. 本文创新性地提出数智太阳系概念与方案设想, 以交叉知识体系为内核, 以数字孪生设施为载体, 依托智能算法与工具实现赋能, 构建数智化协同生态与环境. 提出围绕交叉知识体系、全域数据工程、智能演化计算和协同创新平台四个专题的数智太阳系建设方案, 系统探讨其在科学研究、工程实施、科普宣传与国际合作的潜在应用场景, 为中国深空探测事业高质量发展提供新路径、新模式与新支撑, 推动深空科学研究范式和深空探测工程实施范式变革.

**关键词** 数智太阳系, 深空探测, 数字孪生, 人工智能

**中图分类号** V11, V57

## Concept and Framework Development of the Digital-Intelligent Solar System

GUAN Feng<sup>1,2</sup> GE Ping<sup>1,2</sup> LIU Shuangliang<sup>1</sup> MA Ke<sup>1</sup>  
JIANG Yichen<sup>1</sup> LI Xiang<sup>1</sup> XU Yanli<sup>1</sup>  
SHAO Yanli<sup>1</sup> KANG Yan<sup>1,2</sup> LIU Jizhong<sup>1,2</sup>

1(Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100195)

2(Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100041)

**Abstract** Human exploration of the solar system is entering a new phase characterized by deeper interdisciplinary integration, increased mission complexity, and broader international engagement. Emerging technologies such as big data, artificial intelligence, and high-performance computing are reshaping

\* 基于数字太阳系的协同设计与仿真项目 (YJ07KTL010AH1XT-2429), 中国工程院院地合作项目 (2024-DFZD-47) 和民用航天技术预先研究项目 (D040102) 共同资助

2025-07-20 收到原稿, 2025-09-06 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

the landscape of deep space exploration. The innovative concept and architecture of a Digital-Intelligent Solar System is proposed in this study. This vision integrates a cross-disciplinary knowledge as the core of this concept, leverages digital twin facilities as its infrastructure, and relies intelligent algorithms and tools to enable a collaborative digital ecosystem. A comprehensive development plan centered on four key pillars is outlined: cross-disciplinary knowledge system, full-scope data engineering, adaptive intelligence and computation, and innovation platform driven by collective intelligence. Potential application scenarios are designed in scientific research, engineering implementation, science communication, and international cooperation. This architecture offers a new pathway, model, and support system for advancing China's deep space exploration capabilities and promoting transformative changes in both scientific inquiry and engineering practices.

**Key words** Digital-Intelligent Solar System, Deep space exploration, Digital twin, Artificial intelligence

## 0 引言

从 21 世纪初开始, 中国从无到有开展了月球和火星探测, 小行星探测任务不断深入推进<sup>[1-4]</sup>. 嫦娥工程不断取得新的进展, 获取了 7 m 分辨率的高分辨率全月影像, 实现了人类首次月背巡视探测与中继通信, 测到了最年轻的月岩年龄, 并首次采回了月背样品<sup>[5-9]</sup>; 首次火星探测任务天问一号通过次表层探测雷达发现了三十多亿年前火星水活动的证据<sup>[10]</sup>; 天问二号任务正在执行中, 将实现小行星 2016 HO3 的探测取样返回和主带彗星 311 P 的伴飞观测<sup>[11]</sup>. 随着深空探测科学、工程、技术的飞速发展, 中国深空探测由月球逐步向行星际空间拓展, 探测模式逐渐从短期访问向长期驻留转变<sup>[12]</sup>, 后续任务将面临技术难度高、牵涉合作方范围广等挑战, 深空科学研究也迎来了前所未有的机遇<sup>[13]</sup>.

当前, 新一轮的科技革命正在兴起, 而人工智能是引领这一轮科技革命和产业变革的战略性技术, 具有溢出带动性很强的“头雁”效应<sup>[14]</sup>. 新一代科技正在对科技创新和人类社会发展带来难以估量的作用和深远的影响, 当前已在智能制造、智慧交通、智慧医疗等领域取得突破性成效, 推动相关产业升级<sup>[15-17]</sup>. 以大数据、人工智能 (AI)、大计算为典型特征的“人工智能+”不仅引发深空探测科学研究范式和工程技术创新范式变革, 改变了科学发现的方式和工程实施模式与流程, 而且将显著影响全球产业结构和人才布局, 改变世界航天格局<sup>[18]</sup>.

本文基于深空探测领域的发展需求和 AI 赋能的发展态势, 探讨性提出数智太阳系的概念, 结合国家

深空探测的发展需求和任务特点, 研究提出以数字化为基、智能演化与计算为擎, 推动深空探测领域工程、科学与技术深度融合的数智太阳系构建方案, 实现深空探测成果的高效转化.

## 1 国内外研究现状及发展态势

在科技飞速发展的当下, 全球航天机构纷纷将人工智能融入深空探测领域. 人工智能正在科学研究、工程应用、科普教育等不同细分领域, 以其强大的智能化、自主化优势全方位赋能深空探测, 推动人类的深空探索事业迈向新高度.

### 1.1 国际研究现状及发展态势

在科学研究方面, 正在从传统的实验观测、理论推演、计算仿真向数据驱动、智能驱动转变<sup>[19]</sup>. 美国国家航天局 (NASA) 创建并持续完善的行星数据系统 (PDS), 目前已储存超过 100 PB 科学探测数据, 推动形成了基于大数据的面向月球与行星形貌、天体内部物质组成及地质活动、空间环境等领域的科学研究方法<sup>[20]</sup>. 伴随着 ChatGPT 等的成功, NASA 与 IBM 合作开发面向太阳物理学、行星科学、天体物理学等领域的 INDUS 大语言模型, 加速新科学研究方向的提出, 为太阳系科学研究提供全新视角<sup>[21]</sup>. 欧洲航天局 (ESA) 在行星科学档案 (PSA) 基础上, 开发虚拟欧洲太阳和行星接入 (VESPA) 系统, 为用户提供行星多圈层耦合等复杂模型的输出结果, 并联合多家机构基于扩展现实技术构建地外天体物理环境, 辅助科学家、工程师合作开展虚拟测试<sup>[22]</sup>. 此外, 一名美国高中生通过开发 VARnet 机器学习模型, 对未被

充分利用的 NEOWISE 收集的 2000 TB 天文数据进行处理分析, 成功识别出约 150 万个潜在新天体, 引起国际广泛宣传和关注, 体现了 AI 助力深空创新发展的全新方法思路<sup>[23]</sup>.

在工程实施方面, 深空探测工程任务正逐渐从以文档为中心的自动化向以数据为中心的自主化、智能化发展. NASA 组织开发了 GMAT 通用任务分析工具, 用于支持从低地球轨道到月球、自由点和更远深空等多种飞行任务的空间任务设计、优化和导航<sup>[24]</sup>; APGEN 多任务计划应用程序可用于航天器任务调度规划, 通过人工智能生成面向深空领域的解决方案, 推动 NASA 工作范式转型, 加速了领域创新<sup>[25]</sup>. ESA 于 2024 年成立了 AI 实验室, 致力于将 AI 赋能于空间探索的不同阶段, 包括借助扩展现实 (XR) 技术助力宇航员训练、利用数字孪生工具优化任务规划与管理等, 以优化决策、简化操作并应对深空任务带来的挑战<sup>[26]</sup>.

在科普教育方面, NASA 开发了 NASA's Eyes 系列天体可视化系统, 通过提供空间任务模拟等沉浸式 3D 可视化与互动操作体验、科普讲解及对接教育学习, 支持博物馆、课堂等多场景教育应用, 以直观有趣的方式激发公众对深空探测领域的兴趣, 助力科学普及与教育培养<sup>[27]</sup>. NASA 打造了可供天体物理学、行星科学等跨学科群体共同使用的科学探索者 (SciX) 多学科平台<sup>[28,29]</sup>; 着手创建知识图谱, 构建深空领域实体复杂关联关系<sup>[30]</sup>; 开展 MarsXR 等数字天体 3D 可视化和虚拟现实交互平台建设工作, 为不同背景用户提供开放共享共建数字化生态<sup>[31]</sup>. 日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 基于“辉夜姬”月球轨道器数据打造了教育网站, 提供月球图像、科普文章等原创教育教学资源, 帮助公众了解月球探测成果与进展<sup>[32]</sup>.

## 1.2 中国研究现状及发展态势

随着深空探测任务整体难度不断增强, 协同场景日趋复杂, 中国在科学研究、工程实施和科普教育方面也开展了数智化实践, 形成初步应用基础.

在科学研究方面, 国家航天局基于 B/S 架构建成月球与行星数据发布系统, 服务探月工程 and 天问一号科学数据发布、申请, 其累计数据量超过 40 TB<sup>[33]</sup>. 山东大学研发的行星数据系统 (PDS-SDU), 集成行星科学数据及数据服务, 为科学用户提供存储、管理、可视化、分发与处理等功能<sup>[34]</sup>. 中国科学院地球

化学研究所综合多领域应用需求, 集成了超过 1 PB 月球探测与成果数据, 构建了月球科学数据体系及计算方法库, 设计了可提供科学热词搜索、着陆区选址、地表巡视任务仿真模拟、全息投影式科普等功能的综合性平台<sup>[35,36]</sup>; 同时, 提出了月球与行星科学多模态大模型, 协助学者处理并分析月球与行星数据<sup>[37]</sup>. 国内多所高校和研究机构基于深度学习技术研发的行星探测特征信息提取与知识挖掘方法, 实现了行星形貌特征自动识别、物质成分高效提取、尘卷风自动检测等能力, 助力在月球与行星内部结构与过程、表面形貌演化等科学问题中取得突破性认识<sup>[38-42]</sup>.

在工程实施方面, 中国已逐步在深空探测工程任务中引入基于模型的系统工程 (MBSE) 研制模式<sup>[43-45]</sup>, 积极探索人工智能等前沿技术手段<sup>[46-48]</sup>, 从以文档为中心向以数据为中心过渡发展, 初步研发了任务总体设计与多学科协同验证工具, 用于 CE-8 和 TW-3 等任务. 在任务实施与运行阶段, CE-3 等任务设立了遥科学探测分系统, CE-5 和 TW-1 等任务中研制了有效载荷应用软件 (OMSP) 或遥科学探测仿真平台等, 实现构建天体表面特定地点三维场景, 建立了 VR 遥操作人机交互界面, 利用虚拟现实 (VR) 等多种可视化方式, 辅助科研人员对月表特定地点进行探测任务的仿真训练、仿真规划和执行监控, 以实时交互或联动方式控制有效载荷完成探测任务<sup>[49-51]</sup>. 此外, 还将机器视觉智能感知、位姿机动智能决策等智能处理方法应用于 CE-6, TW-1, TW-2 等深空探测任务的着陆、采样与微小机器人自主操作过程中, 显著提升了任务实施效果<sup>[52-55]</sup>.

在科普教育方面, 中国航天系统科学与工程研究院打造了航天科普 APP 和科普专业体验中心, 覆盖航天在线查询知识库、科普课程, 并借助 XR 技术模拟航天工程场景<sup>[56]</sup>. 中国青年报社、中国运载火箭技术研究院等联合推出了航天科普公益在线素质课程, 推动航天知识普及, 激发公众对深空的探索兴趣<sup>[57]</sup>. 以上多种形式开创了全新的科普模式, 为公众了解航天及深空探测构建了沉浸式、互动化的知识获取渠道, 助力深空探测知识的广泛传播与深度普及.

总体来看, 中国在深空探测数智化赋能方面已经取得诸多成果, 但与国际上相比, 仍存在诸多差距, 具体如下.

数据资源分散, 数据利用率不高. 历次探月工

程、行星探测工程科学数据虽有积累,但数据规模、种类、服务程度与国外数据平台相比仍存在差距,缺乏系统性整合,难以形成多维度数据关联分析能力,导致国内数据利用效率低,严重制约了深空探测任务的自主设计与科学研究的深度拓展。

工程实施智能化程度不强.中国深空探测工程中智能应用多集中于任务后期的数据处理与分析,缺乏对任务全周期的实时规划与动态调节能力,尚未实现从任务规划、论证到运营的全链条智能化联通,难以实现对复杂深空环境的精准模拟与任务优化,致使工程实施效率与可靠性提升有限。

现有平台在科学、工程、技术融合方面成效不足,跨领域协作能力薄弱,应用场景局限于任务部分环节,尚未形成多学科协同创新生态,无法满足太阳系起源与演化、生命探寻等前沿科学研究及深空探测工程实施需求,对开展高质量深空探测国际合作、科普教育的支撑力度不足。

## 2 数智太阳系概念

数智太阳系面向深空探测领域重大工程与科学问题,聚焦太阳、行星及卫星相互作用规律,以及地质、生命、空间环境与气候演化问题,高质量汇聚全球深空大数据资源,充分利用人工智能、物联网、大计算等技术,建立多时空尺度、多维、多模态的太阳系数字孪生体,形成数据驱动、模型推理、标准统一的智能协同创新生态平台,有效支撑深空探测任务论证与实施、科学研究与应用、科普教育、国际合作等。其以交叉知识体系为内核,由数字孪生设施承载,通过智能算法与工具赋能,营造深空探测的数智化协同生态与环境。相关概念描述如图1所示。

**内核: 交叉知识体系.** 数智太阳系的内核包括深空探测领域科学、工程和技术深度交叉与重新组配后形成的知识体系。主要形式为基础科学原理、工程实践经验和深空探测技术的多维交叉网络关系,可推演、可验证,能够综合不同领域知识,解决深空探测任务中常面临的复杂问题,为深空探测任务的智能化实施提供底层认知框架,促成认识和方法创新。

**载体: 数字孪生设施.** 数智太阳系的物理载体为太阳系数字孪生设施,由多层级硬件与多元化软件协同构建而成。硬件以高性能计算、存储和交互设施为

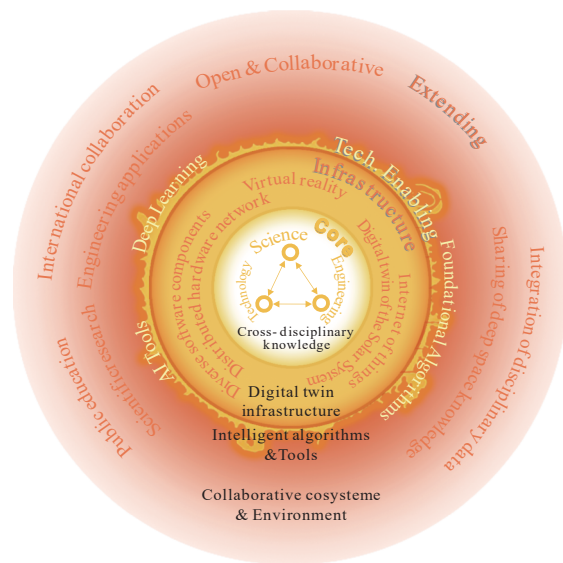


图1 数智太阳系概念

Fig. 1 Conceptual diagram of the Digital-Intelligent Solar System

主体,形成弹性可扩展的分布式硬件网络;软件通过整合太阳系多模态信息与物理规律,形成太阳系物理世界的孪生镜像,并随着人类认知不断进化。后续,随着物联网、虚拟现实等的不断融入,太阳系数字孪生设施将在以虚代实的基础上逐步实现虚实共生。

**赋能: 智能算法与工具.** 数智太阳系是一个由人工智能算法与多学科知识体系赋能的智能系统。通过基础算法整合跨学科先验知识,基于深度学习等人工智能技术构建面向不同应用场景的智能工具,将多领域数据和多学科知识转化为可量化操作的智能服务能力,形成贯穿任务全生命周期的技术赋能链。

**外延: 协同生态与环境.** 数智太阳系的外延体现为多维度的深空探测协同生态。通过整合太阳系科学数据和协同创新工具,挖掘和共享深空科学知识,在推动数据驱动的深空科学发现与工程模型升级的同时,形成一个开放、协同、智能的深空探测科学研究、工程应用和科普教育生态。

## 3 总体构想及构建方案

### 3.1 总体构想

针对深空探测数据分散且综合效益发挥不足、工程设计与实施智能化程度偏弱、现有平台对科学-工程-技术融合深度不够等问题,在已有深空探测科学

研究、工程任务仿真、人工智能技术等能力基础上,整合太阳系大数据、大知识和大计算,开展太阳系智能演化与计算研究,形成智能演进与协同创新的群智协同创新平台,提升对深空探测复杂工程任务的全链条数智化支撑能力,实现人工智能赋能深空探测任务与太阳系科学研究,为深空探测科学-工程-技术融合与人才引进高地构建提供支撑环境,推动深空科学研究范式和深空探测工程实施范式变革.数智太阳系总体构想如图2所示,主要包括交叉知识体系、太阳系全域数据工程、群智协同创新平台、智能演化与计算.

### 3.2 构建方案

#### 3.2.1 交叉知识体系

基于数字太阳系定义和总体构想,构建科学(S)、工程(E)、技术(T)深度融合的交叉知识体系(见图3).通过知识抽取方法,将深空探测相关的科学域、工程域、技术域的概念、理论、模型、方法转化为知识或量化参数,逐级拆解知识和参数使其细化为可关联或可计算的基本单元(实体);通过知识图谱等结构化技术建立基本单元间关系链,形成立体化关联网络,实现跨领域跨学科逻辑贯通;嵌入知识进化机制,利用应用场景模拟、真实数据反哺等方式获取动态信息,支持概念、理论模型和方法的实体更新,形成可修正、重组、扩展等的交叉知识体系.例如,通过知识抽取方法,将地外天体水冰科学主题映射为水冰形成、分

解、迁移与储存等基础理论与概念,将水冰探测工程任务映射为历史任务中实施方式与探测成果,将水冰探测技术映射为探测仪器与载荷;进一步把这些基础信息拆解为水冰成分、物质结构、分子键振动、天体表面水冰丰度、仪器水冰信号检出限、发射功率与能源消耗等可关联与计算的基本单元;建立各实体关联的多领域多学科关系网,支持实体的溯源推演与影响分析.

在实施过程中,依托跨学科协作平台整合基础科学、航天工程技术与人工智能领域智慧,开发准确可靠的知识生产工具链,并建立开放共享机制,通过联邦学习等技术融合各领域知识,形成持续生长的空间认知共同体.该体系将分散的隐性知识转化为可计算的数字资产,支撑从科学发现到工程实施的全链条智能关联与推演,推动深空探测向知识驱动发展,为揭示太阳系演化规律、实现地外资源可持续勘探与开发奠定认知基础.

#### 3.2.2 太阳系全域数据工程

数智太阳系的数字化和智能化依赖海量的数据基础.面向太阳系数据的复杂性,太阳系全域数据工程建设采用“数据汇聚—技术治理—工具赋能—数据服务”的四层架构,如图4所示,在实现高效、高质数据汇聚与服务的基础上,构建“数据汇聚—应用创新—知识迭代”的闭环演进机制,使整个数据工程体系具

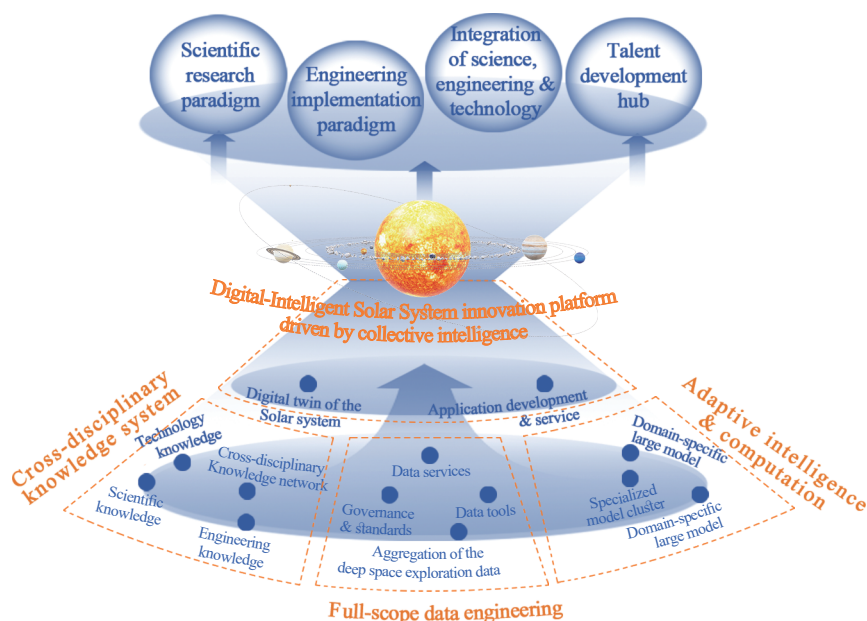


图2 数智太阳系总体架构

Fig. 2 Architecture of the Digital-Intelligent Solar System

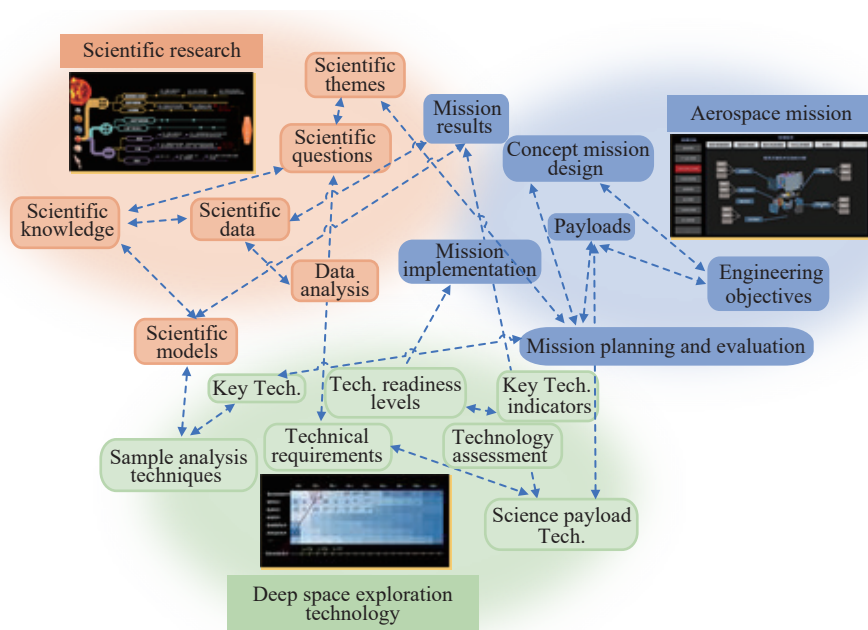


图 3 交叉知识体系

Fig. 3 Cross-disciplinary knowledge framework

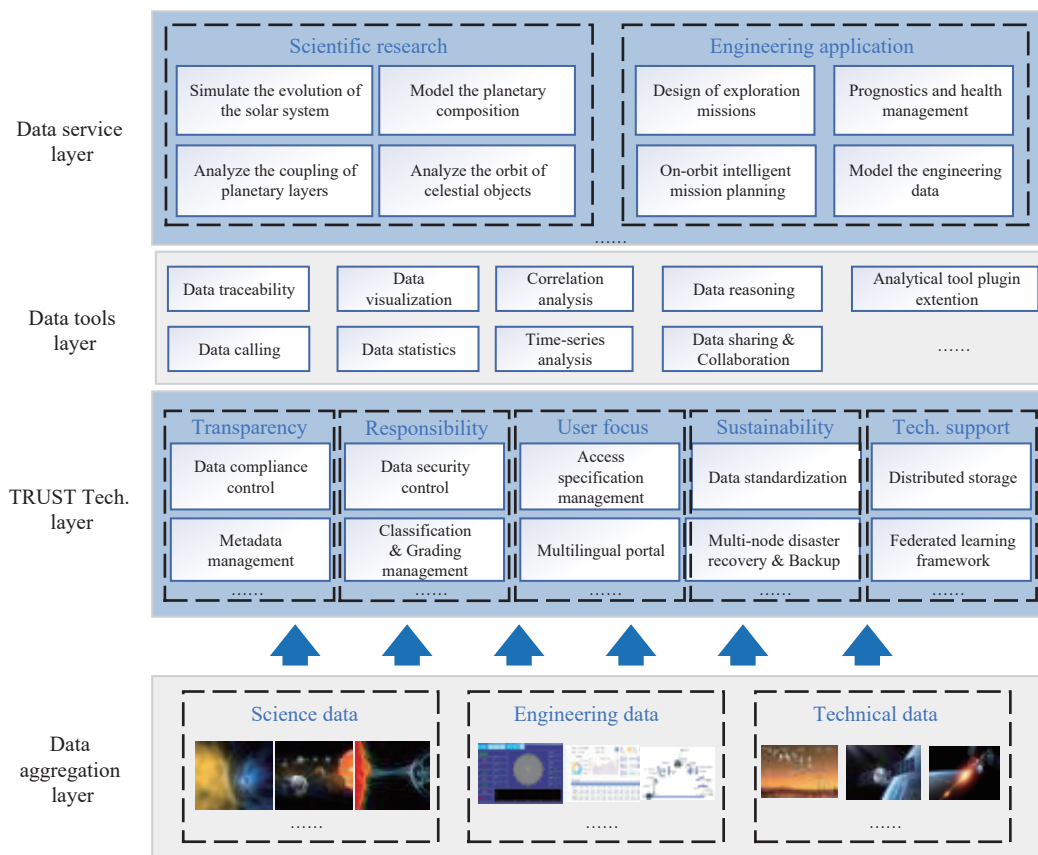


图 4 太阳系全域数据工程建设架构

Fig. 4 Framework of the full-scale data engineering of the Digital-Intelligent Solar System

备持续优化与自我完善能力。

数据汇聚 (Data aggregation layer) 层面向深空领域各大科研机构、院校企业等, 全方位汇聚科学、工程、技术等多领域多模态数据; TRUST 技术层 (TRUST Tech. layer) 以 TRUST 原则为核心<sup>[58]</sup>, 通过合规性控制、分级分类管理等数据治理技术, 构建覆盖数据全生命周期的可信保障框架; 数据工具层 (Data tools layer) 聚焦数据的深度处理与价值挖掘, 构建知识引导的自主治理中枢, 通过数据智能挖掘、数据推理、数据可视化等工具, 实现智能化数据处理流程, 为上层数据应用提供强大的分析支撑能力; 数据服务层 (Data service layer) 面向科学家、工程技术人员、社会用户等, 提供科学、技术、工程、科普等数据产品、数据应用等服务内容, 并通过反馈机制将数据服务过程中的新发现纳入数据工程建设, 驱动知识体系的动态更新, 从而实现“数据汇聚—应用创新—知识迭代”的闭环演进。

3.2.3 群智协同创新平台

群智协同创新平台是实现太阳系物理空间与数字空间相互映射的核心载体, 是面向用户开展科学研究、工程方案探索、科普教育和协同创新的门户, 主要由太阳系数字孪生体与应用服务两部分组成。其中

太阳系数字孪生体为多维物理世界的数字映射, 具有多领域模型耦合、自我演进等典型特征; 应用服务主要包括仿真调度与可视化、协同设计与管理服务, 面向科学、工程、宣传合作等领域, 为全球不同层级、不同类型用户提供服务。群智协同创新平台的总体架构如图 5 所示。

图 5 中的硬件层 (Hardware layer) 主要由孪生与智能计算、传感器网络两大部分组成, 其中孪生与智能计算支撑条件主要为太阳系数字孪生和智能计算所需的多类型算力及存储资源; 传感器网络包括天地基的传感器及其网络, 传感器网络是实现太阳系虚实交互孪生的感知媒介。

数据层 (Data layer) 是为群智协同创新平台直接服务的相关数据, 主要包括 4 大类: 太阳系中自然天体数据、人造天体的数据以及反映二者之间交互的数据、天地基传感器网络中获取的实时数据、任务成果相关数据。

模型层 (Model layer) 主要包括物理模型、支持科学研究和工程任务论证的模型算法、智能算法等, 这些算法与模型使用多种策略组织, 为服务层提供支持。

服务层 (Service layer) 按照用户需求, 封装业务

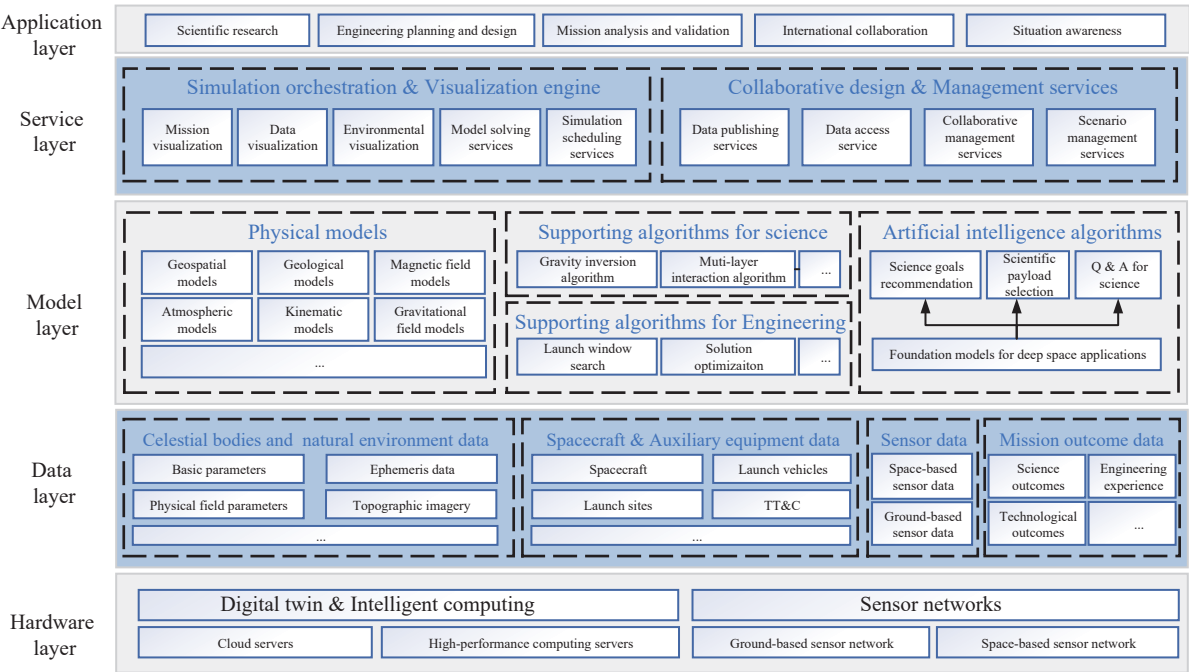


图 5 群智协同创新平台架构

Fig. 5 Framework of the innovation platform driven by collective intelligence

规则、流程和计算,协调数据、模型的管理与调用.仿真调度与可视化引擎是群智协同创新平台的核心控制单元,承担对外接受应用层指令、对内组织仿真任务执行的双重职责,其功能定位是实现系统级任务调度、场景可视化与精细化管理.协同设计与管理服务的主要功能是实现数智太阳系系统与外部系统的数据交互和功能集成,提供标准化的对外数据服务接口及协同设计服务接口.通过 RESTful API、数据订阅和实时推送等多种形式进行异步数据通信,满足多样化访问需求,确保平台的数据可以被外部用户高效使用.

应用层 (Application layer) 面向科学研究、工程论证、国际合作、态势展示等应用场景,合理调用服务层的功能服务,形成专业领域产品,满足应用需求.

### 3.2.4 智能演化与计算

当前人工智能产业化发展已形成体系化格局,DeepSeek, Claude, GPT 等通用大模型凭借其强大的跨领域泛化计算能力,在医疗、金融、工业等领域实现了规模化赋能.数智太阳系在已有基础大模型基础上,通过构建专业领域大模型、智能应用工具集,实现人工智能在深空领域落地,为科学研究、工程实施等智能化赋能奠定基础.数智太阳系智能演化与计算框架如图 6 所示.

基于通用的基础模型 (Foundation model),构建深空探测领域模型 (Domain-specific large model),将学科知识、专家经验等注入,通过增量预训练、有

监督微调 (SFT)、人类偏好对齐,实现深空探测知识迁移与能力聚焦.在训练过程中,首先基于深空探测交叉知识体系,确定深空探测专业领域大模型的专业化分工,在混合专家模型 (MoE) 架构中进行增量预训练与有监督微调,形成若干具备专业分工的专家子模型,例如行星地质专家、天体化学专家、轨道动力学专家等;建立物理规则约束与专家知识验证机制,开展人类偏好对齐,确保生成结果具备科学可解释性.同时,构建可复用的面向基础大模型的微调框架,支持新出现大模型的训练与微调,形成专业领域大模型的持续迭代能力.基于不同应用场景,混合专家模型 (MoE model) 可通过分层蒸馏技术生成参数量级适配不同硬件环境的轻量化版本,形成中心-边缘-终端的模型多级弹性适配体系.例如千亿参数级完整模型可部署于数字太阳系计算中心,支撑高精度孪生模拟与智能决策调用;百亿参数级模型经任务特定蒸馏可适配不同需求边缘计算节点;十亿级智能模型可部署在星载设备中,实现星表巡视器路径规划等.

智能工具 (Agent tools) 是面向不同用户、不同应用场景开展数智太阳系智能演化与计算的服务工具,主要由深空探测领域智能体基础平台和多个具备自主决策与场景适配能力的智能体组成.深空探测领域智能基础平台按照需求,整合深空探测领域多学科知识、多模态数据资源、孪生计算核心算法及分级智能模型资源,组合调用形成不同智能体工具,如科学

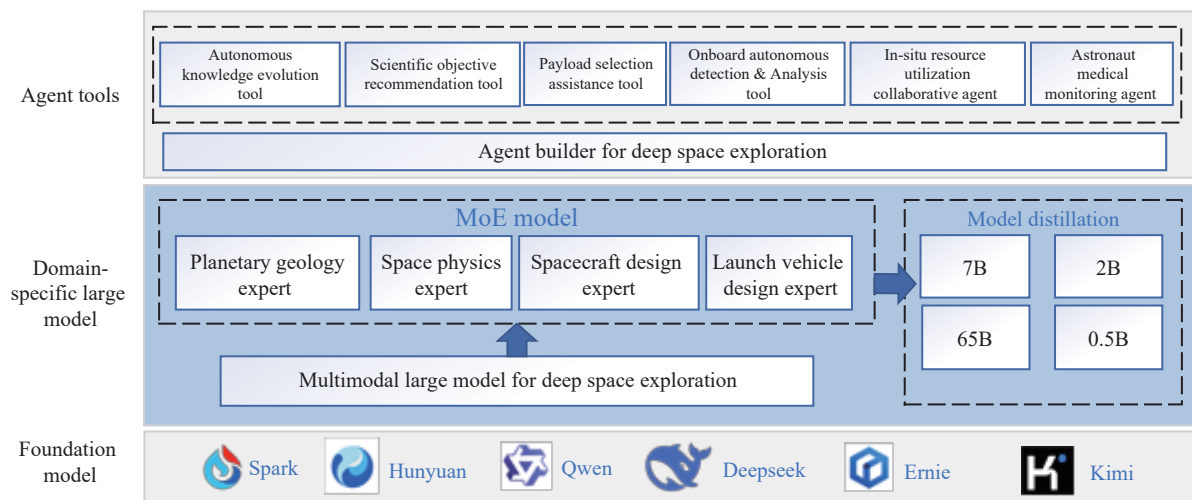


图 6 智能演化与计算框架

Fig. 6 Framework for adaptive intelligence and computation

目标动态推荐、载荷搭载自主分析等, 实现智能领域模型的落地应用。

3.3 发展思路

数智太阳系建设按照融合创新、标准规范、体系构建、分步实施、边建边用、开放共享的思想, 构建覆盖深空探测任务全生命周期的科学探索、工程实施、多方参与的多维度数字化服务体系。按照平台建设、重点突破、能力深化与应用赋能、数字化生态构建与范式变革三个建设阶段实现从基础能力构建到智能化服务跃升的渐进式发展 (见图 7)。

第一阶段: 平台建设与重点突破 (2025—2028 年)。主要汇集国内深空探测各领域数据, 构建领域交叉知识体系和标准规范体系, 设计并搭建数智太阳系群智协同创新平台原型系统, 实现数据基础管理、接口服务管理、科学数据可视化、协同设计与仿真等基础服务能力; 接入科学目标谱系等其他已建成的深空探测领域数字化软件系统, 在深空探测科学研究、工程任务实施、科普教育、国际合作等方面初步开展应用。

第二阶段: 能力提升与应用赋能 (2028—2030 年)。在数据方面完成太阳系全域数据汇聚, 完善领域交叉知识体系和标准规范体系。拓展群智协同创新平台的智能化水平和协同效率, 建成领域智能化国际协同平台, 显著提升数智化服务能力, 推动深空探测领域形成重大突破。

第三阶段: 数字化生态构建与范式变革 (2030 年以后)。在数据和知识体系方面实现二者的自构建, 结合 VR、物联网等技术, 在群智协同创新平台中实现

虚实交互的太阳系数字孪生体构建, 打造国际深空探测数智化生态, 形成深空探测领域科学研究和工程实施新范式。

4 典型应用场景

4.1 科学研究

科学研究是深空探测领域的核心驱动力, 推动深空探测技术的不断迭代升级, 逐步实现从地球到遥远深空的跨越, 拓展人类生存空间; 随着探测活动的不断深入, 还将解析天体物质组成、演化规律等, 为揭示宇宙起源、行星起源、生命起源等关键问题奠定基础。数智太阳系依托海量多源异构集成数据、深度融合的科学工程技术知识体系、领域智能算法模型, 能够聚焦宇宙本质、太阳系演化、生命起源等核心问题, 辅助科学家开展太阳系科学研究。

数智太阳系通过整合天文观测数据、遥感数据、实验室模拟数据、国际合作共享数据等不同来源数据, 突破传统单一数据源的认知局限, 构建行星形成、演化与宜居性的多维度证据链, 建立行星“内核 (地核动力学)—表层 (大气/海洋)—空间环境 (太阳风侵蚀)”的多尺度耦合模型, 精准建立行星岩石圈、地幔、大气、电离层、磁层的多圈层耦合环境, 解释类地行星多圈层耦合机制, 对行星演化 (大气逃逸、磁场衰减等)、地外生命宜居性 (如电离层对太阳风的屏蔽效应) 等前沿科学问题开展探索, 促进“科学+智能”的交叉创新。

通过研究柯伊伯带小天体动力学, 对比系外行星

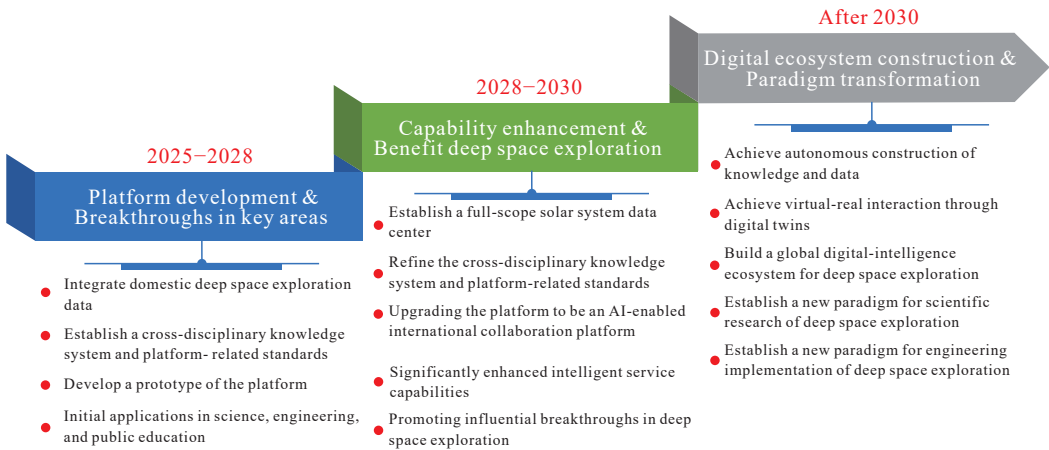


图 7 数智太阳系发展路线

Fig. 7 Development roadmap of the Digital-Intelligent Solar System

系统中类似盘状结构的动力学特征,可揭示行星迁移、轨道共振等普适性演化规律,建立行星系统模型的统一框架,加深人类对太阳系演化机制的理解认知.通过建立涵盖雅可夫斯基热辐射效应(非引力效应)、潮汐耗散(引力效应)等机制的综合模型,能够显著提升近地小天体轨道演化规律的解析精度,为揭示太阳系小天体动力学演化机制提供关键理论支撑,深化对太阳系形成与演化的科学认知.

## 4.2 工程实施

深空探测任务具有距离遥远、飞行时间长、数传速率有限、深空环境复杂且不确定等一系列特点,其任务难度随着探测的深入而逐渐增大<sup>[4]</sup>.数智太阳系基于深度融合的科学、工程、技术知识体系与智能模型算法,构建面向深空探测任务需求的智能工具,深度赋能深空探测任务不同流程阶段,辅助任务论证设计与在轨工程管理等关键环节工作,并通过建立数据反演机制实现领域知识、模型算法等核心内容的自适应更新,实现平台能力的自主动态提升.

(1) 深空探测任务论证与设计优化.数智太阳系通过构建知识驱动的智能决策框架,实现从科学目标遴选到工程方案生成的全链条优化.在任务论证阶段,基于交叉学科知识图谱与领域大模型,结合动态更新的数字孪生模型,系统自动筛选具有创新性、可行性的科学目标,通过多目标约束优化算法生成任务优先级排序方案.任务设计阶段采用数字孪生技术构建多物理场耦合仿真环境,支持轨道动力学推演、有效载荷配置优化设计、多约束下的智能选配、探测器系统匹配性验证、多方案动态仿真验证和比选等关键环节.

(2) 工程在轨自主管理与智能响应.数智太阳系构建“感知—决策—执行”闭环管控体系,赋能多探测器的自主协同与应急响应.在任务运营阶段,基于星载传感器实时数据流,通过轻量化孪生模型重构探测器健康状态与环境交互过程,实现航天器的实时自主管理;在探测过程中,通过动态感知环境变化,自主规划探测任务,动态平衡科学产出、能源消耗与通信窗口约束,将探测结果在数智太阳系中实时交互;针对未来可能面临的空间资源勘查与开发情景,数智太阳系通过多源数据融合与虚拟仿真技术,开展动态三维资源分布建模并动态调整勘探与开发策略,进而结合虚拟开采过程推演,形成数字化空间资源勘探与开

发,形成从资源定位到原位利用的闭环技术链,为未来建立地外资源开发体系、实现能源与材料的空间自供给奠定基础,推动人类探索活动从地球依赖型向空间自主型演进.

(3) 工程任务数据反演.依托持续积累的工程经验库与物理规律模型,利用知识图谱技术建立多源异构数据的语义关联,实现领域知识的动态扩展与自我验证;通过自适应学习等人工智能技术实现模型的动态更新.例如,探测器穿越火星沙暴时记录的尘埃沉积数据,经过反演分析可用于优化防尘涂层材料设计准则;深空通信链路中断事件可通过因果推理引擎提炼抗干扰操作预案,同步更新至智能决策知识库.这种数据—模型动态迭代机制突破了传统经验依赖型工程模式,使探测系统具备从实际运行反馈中持续优化设计规范与决策逻辑的能力,为深空探测任务的全生命周期自主演进提供认知基础,推动工程体系从静态预设向动态适变的跃迁.

## 4.3 科普宣传

开展深空探测科普宣传,有助于激发公众科学兴趣,提升全民科学素养,增强国家科技自信与战略认同.建设数智太阳系软件平台,不仅面向科研和工程任务服务,也应承担起面向社会公众的科学传播职责.通过构建可视化、互动化、智能化的数字体验体系,有望使其成为连接前沿科学与大众认知的桥梁,推动科学传播范式转型,实现从“灌输式”知识传递向“参与式”科学共创的跃迁.

(1) 构建沉浸式科普体验场景.数智太阳系集成高精度天体建模、时空数据渲染与交互可视化能力,构建沉浸式空间科普场景,支持公众通过移动终端、公共展示屏幕或沉浸设备浏览太阳系三维场景、体验VR/AR漫游、观看虚拟探测任务演示,增强对空间环境的直观感知.结合AI生成讲解、可调节的科学深度、语音交互等功能,平台将具备面向不同年龄和教育层级分级传播的能力,满足多层次公众科普需求.

(2) 打造数字时代的公众参与机制.数智太阳系平台具有开放性数据分析与任务模拟模块,赋予公众参与感和贡献感.用户可通过虚拟天文台与模拟探测计划功能,自主设计探测路线、模拟登陆演练、分析真实遥感数据,激发探索兴趣.面向高校和中学,可开放教育版API与教学工具包,辅助教师教授深空课程、组织天文兴趣活动等.

(3) 推动全球航天文化传播与交流. 作为面向全球的数字基础设施, 数智太阳系平台具备成为国际航天科普枢纽的潜力, 通过设置多语言界面、文化适配内容与区域特色科学模块, 推动中国深空探测成果、航天成就与科学理念向全球公众传播. 与国际科普机构、高校等开展联合科普活动、跨国青少年挑战赛等, 激发跨文化背景下对宇宙科学的共同好奇与价值认同, 构建开放共享的全球空间科普平台.

#### 4.4 国际合作

开展深空探测国际合作, 可实现各国优势资源互补, 整合全球科技资源, 推动全球共同探索宇宙奥秘, 促进平等互利、和平利用、包容发展、合作共赢理念形成, 在外空领域推动构建人类命运共同体. 数智太阳系构建的开放、智能、协同的深空探测数据共享应用平台, 打通标准分散、格式异构、语言壁垒等问题, 为全球科研人员和航天机构提供统一的数据接入、任务仿真和联合研究环境, 推动国际合作进入新阶段.

(1) 全球深空探测数据共享与应用. 数智太阳系平台建设统一的国际数据接入与共享体系, 基于多模态大模型与知识图谱技术, 支持实现不同国家探测数据的跨任务对比, 辅助各国深空探测科研人员快速构建任务场景、提取时空变化趋势, 同时确保在主权保护前提下开展安全的数据共享与联合建模, 赋能全球深空科学研究的开放创新.

(2) 联合任务设计与虚拟仿真协作. 数智太阳系平台基于不同科学家、工程师需求构建协同探测模型, 支持模型、场景的实时构建与共享, 并借助大模型辅助完成轨道计算、着陆点遴选、通信链路分析等核心任务. 集成 AI 翻译、建模注解、物理推理等智能助手, 降低语言与知识门槛, 提升国际合作效率.

(3) 联合任务发布与科学研究. 数智太阳系平台提供任务公告、目标协商、成果归档、科学出版等完整链条, 支持多边机构基于共同兴趣提出协同观测计划、科学问题攻关项目等, 并统一管理进度、资源与数据授权. AI 将辅助生成科学问题摘要、任务影响预测报告、交叉学科研究路径建议等, 提升跨国团队的议题凝聚与成果产出效率.

## 5 结语

随着深空探测任务日益复杂、跨学科融合程度不

断加深, 传统的工程实施和科学研究模式已难以满足未来任务高效协同与持续演进的需求. 构建数智太阳系作为面向深空探测未来发展的新型基础设施体系, 是顺应“人工智能+”赋能深空探测、实现任务全链条智能化支撑的有力手段. 数智太阳系应包括四大关键要素: 交叉知识体系、太阳系全域数据工程、群智协同创新平台以及智能演化与计算, 共同支撑科学发现、工程论证、任务实施、科普教育与国际合作等多领域的深度融合与高效开展. 结合国家深空探测的发展规划, 提出数智太阳系建设的三阶段发展路径: 第一阶段(2025—2028年)聚焦基础平台建设与关键能力突破, 重点完成数据汇聚、知识体系、平台原型系统与标准框架的构建; 第二阶段(2028—2030年)提升平台智能化水平, 加强领域协同与国际合作, 推动数智化服务能力的深化; 第三阶段(2030年以后)实现数字化生态的全面构建, 推动深空探测研究与工程实施的范式变革, 建立全球协同创新的深空探测新生态, 全面提升人类认识深空、进出深空和利用深空的能力.

## 参考文献

- [1] YE Peijian, ZOU Leyang, WANG Dayi, *et al.* Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. *Space International*, 2018(10): 4-10 (叶培建, 邹乐洋, 王大轶, 等. 中国深空探测领域发展及展望 [J]. 国际太空, 2018(10): 4-10)
- [2] WU Weiren, WANG Chi, LIU Yang, *et al.* Frontier scientific questions in deep space exploration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(6): 606-627 (吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 深空探测之前沿科学问题探析 [J]. 科学通报, 2023, 68(6): 606-627)
- [3] ZHANG Rongqiao, HUANG Jiangchuan, HE Rongwei, *et al.* The development overview of asteroid exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 417-423, 455 (张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述 [J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 417-423, 455)
- [4] WU Weiren, YU Dengyun. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 5-17 (吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术 [J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 5-17)
- [5] LI Chunlai, LIU Jianjun, REN Xin, *et al.* Lunar global high-precision terrain reconstruction based on Chang'E-2 stereo images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(4): 485-495 (李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 基于嫦娥二号立体影像的全月高精度地形重建 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(4): 485-495)

- [6] WU Weiren, WANG Qiong, TANG Yuhua, *et al.* Design of Chang'E-4 lunar farside soft-landing mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(2): 111-117 (吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. *深空探测学报*, 2017, **4**(2): 111-117)
- [7] ZHANG Q W L, YANG M H, LI Q L, *et al.* Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts[J]. *Nature*, 2025, **643**(8071): 356-360
- [8] LI Q L, ZHOU Q, LIU Y, *et al.* Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'E-5 basalts[J]. *Nature*, 2021, **600**(7887): 54-58
- [9] GE Ping, JIANG Yichen, SUN Yu, *et al.* Progress and prospects of deep space exploration in 2024[J]. *Aerospace China*, 2025(1): 28-38 (葛平, 姜亦宸, 孙宇, 等. 2024年深空探测进展与展望[J]. *中国航天*, 2025(1): 28-38)
- [10] LI C, ZHENG Y K, WANG X, *et al.* Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar[J]. *Nature*, 2022, **610**(7931): 308-312
- [11] LI Chunlai, LIU Jianjun, REN Xin, *et al.* Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, **11**(3): 304-310 (李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置[J]. *深空探测学报* (中英文), 2024, **11**(3): 304-310)
- [12] LIU Jizhong, HU Chaobin, PANG Fuchuan, *et al.* Strategy of deep space exploration[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2020, **50**(9): 1126-1139 (刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, **50**(9): 1126-1139)
- [13] TONG Xiaohua, LIU Shijie, XIE Huan, *et al.* From Earth mapping to extraterrestrial planet mapping[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, **51**(4): 488-500 (童小华, 刘世杰, 谢欢, 等. 从地球测绘到地外天体测绘[J]. *测绘学报*, 2022, **51**(4): 488-500)
- [14] GAO Wen. Seizing the historic opportunity for the development of artificial intelligence: deeply comprehend general secretary Xi Jinping's important expositions on artificial intelligence[J]. *China Information Technology*, 2025(2): 6-9 (高文. 抢抓人工智能发展的历史性机遇——深刻领会习近平总书记关于人工智能的重要论述[J]. *中国信息化*, 2025(2): 6-9)
- [15] PERES R S, JIA X D, LEE J, *et al.* Industrial artificial intelligence in industry 4.0-systematic review, challenges and outlook[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 220121-220139
- [16] MANDAL V, MUSSAH A R, JIN P, *et al.* Artificial intelligence-enabled traffic monitoring system[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(21): 9177
- [17] HAMET P, TREMBLAY J. Artificial intelligence in medicine[J]. *Metabolism*, 2017, **69**: S36-S40
- [18] SUN Pu, YUAN Weijia, SUN Fengli, *et al.* Digital transformation strategy of aerospace industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2025, **27**(2): 216-229 (孙璞, 袁维佳, 孙凤丽, 等. 航天产业数字化转型发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2025, **27**(2): 216-229)
- [19] LI Guojie. AI4R: the fifth scientific research paradigm[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, **39**(1): 1-9 (李国杰. 智能化科研 (AI4R): 第五科研范式[J]. *中国科学院院刊*, 2024, **39**(1): 1-9)
- [20] National Aeronautics and Space Administration. Planetary Data System Roadmap Study for 2017-2026[R]. Greenbelt: National Aeronautics and Space Administration, 2017
- [21] BHATTACHARJEE B, TRIVEDI A, MURAOKA M, *et al.* INDUS: effective and efficient language models for scientific applications[C]//Proceedings of 2024 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: Industry Track. Miami: Association for Computational Linguistics, 2024: 98-112
- [22] RAGA F, DOCASAL R, OSINDE J, *et al.* ESA's PSA: new interface, exploring planetary data[C]//Proceedings of the 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodland: LPSC, 2024: 1496
- [23] PAZ M. A submillisecond Fourier and wavelet-based model to extract variable candidates from the NEOWISE single-exposure database[J]. *The Astronomical Journal*, 2024, **168**(6): 241
- [24] HUGHES S P. General Mission Analysis Tool (GMAT)[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2016
- [25] MALDAGUE P F, WISSLER S S, LENDA M D, *et al.* APGEN scheduling: 15 years of experience in planning automation[C]//Proceedings of the SpaceOps 2014 Conference. Pasadena: AIAA, 2014: 1809
- [26] FERRA L, COSTANTINI M, SALING F, *et al.* Assisting engineering, training and operations for human spaceflight applications using eXtended Reality (XR) technologies [C]//Proceedings of the AR/VR for Space Programmes 2023. The Netherlands: ESA/ESTEC, 2023
- [27] HUSSEY K. NASA's "eyes on the solar system": a real-time, 3D-interactive tool to teach the wonder of planetary science[C]//Proceedings of the American Geophysical Union, Fall Meeting 2014. San Francisco: AGU, 2014: ED33C-02
- [28] ACCOMAZZI A. Decades of transformation: evolution of the NASA astrophysics data system's infrastructure[OL]. arXiv preprint arXiv: 2401.09685, 2024
- [29] BLANCO-CUARESMA S, CIUCĂ I, ACCOMAZZI A, *et al.* Experimenting with large language models and vector embeddings in NASA SciX[OL]. arXiv preprint arXiv: 2312.14211, 2023
- [30] CROSBY N, STOYANOVA K, DAYAL R, *et al.* Development of a knowledge graph for dataset discovery and identification at a NASA data center[C]//Proceedings of the AGU Fall Meeting 2021. Washington: American Geophysical Union, 2021
- [31] CASTILLA-ARQUILLO R, PAZ-DELGADO G J, MADI M, *et al.* Virtual reality lab for rover navigation using mars

- datasets[C]//Proceedings of 2024 International Conference on Space Robotics (iSpaRo). Luxembourg: IEEE, 2024: 315-320
- [32] SOBUE S I, SASAKI S, KATO M, *et al.* KAGUYA (SELENE) education and public outreach activity[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2010, **8**(ists27): Tu\_5-Tu\_8
- [33] ZUO W, LI C L, ZHANG Z B, *et al.* China's lunar and planetary data system: preserve and present reliable Chang'E project and Tianwen-1 scientific data sets[J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(1): 88
- [34] LI Chenfan, YAO Peiwen, LIU Xiang, *et al.* Design and implementation of a planetary data system for Chinese deep space exploration[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(2): 599-613 (李晨帆, 姚佩雯, 刘翔, 等. 面向中国深空探测任务的行星数据系统的设计与实现 [J]. *遥感学报*, 2021, **25**(2): 599-613)
- [35] SUN Pengju, LIU Jianzhong, WANG Juntao, *et al.* Design of digital lunar cloud-based platform[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2022, **41**(1): 135-142 (孙鹏举, 刘建忠, 王俊涛, 等. 数字月球云平台设计 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2022, **41**(1): 135-142)
- [36] BO Zheng. Research on Key Technologies and Applications of Digital Lunar System with Unified Spatial Reference[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022 (薄正. 空间基准统一的数字月球系统关键技术及应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院空天信息创新研究院), 2022)
- [37] LEI Danhong, LIU Jianzhong, ZHU Kai, *et al.* A first look at the concept and application of multimodal large models for lunar and planetary science[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, **43**(2): 343-351 (雷丹泓, 刘建忠, 朱凯, 等. 月球与行星科学多模态大模型的概念及应用初探 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, **43**(2): 343-351)
- [38] ZHAO Zhiruo, WANG Shaoyu, WANG Xinyu, *et al.* An improved deep novel target detection method for Mars rover multispectral imagery[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, **47**(8): 1328-1335, 1348 (赵之若, 王少宇, 王心宇, 等. 一种改进的火星车多光谱影像深度新颖目标探测方法 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, **47**(8): 1328-1335, 1348)
- [39] GUO Z X, XU Y, LI D, *et al.* Martian dust devil detection based on improved faster R-CNN[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, **17**: 7725-7737
- [40] JIANG S C, LIAN Z K, YUNG K L, *et al.* Automated detection of multitype landforms on mars using a light-weight deep learning-based detector[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, **58**(6): 5015-5029
- [41] GUO J L, ZHANG X Y, DONG Y P, *et al.* Terrain classification using Mars raw images based on deep learning algorithms with application to wheeled planetary rovers[J]. *Journal of Terramechanics*, 2023, **108**: 33-38
- [42] WANG X Y, QU H K, WANG Z Y, *et al.* Application of deep learning on quantitative analysis of binary solid dispersions by UV Raman spectroscopy for planetary exploration[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2025, **339**: 126154
- [43] YU Guobin. Application and trend of model-based systems engineering methods for deep space exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, **8**(4): 407-415 (于国斌. 深空探测任务协同的系统工程方法应用及趋势 [J]. *深空探测学报 (中英文)*, 2021, **8**(4): 407-415)
- [44] GUAN Feng, GE Ping, SHAO Yanli, *et al.* Mission analysis of lunar scientific research station based on MBSE[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, **14**(3): 84-99 (关锋, 葛平, 邵艳利, 等. 基于 MBSE 的月球科研站任务分析 [J]. *航空工程进展*, 2023, **14**(3): 84-99)
- [45] GUAN Feng, GE Ping, ZHOU Guodong, *et al.* Development trend of MBSE and investigation of concurrent collaborative demonstration for Chinese lunar exploration program[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(2): 183-190 (关锋, 葛平, 周国栋, 等. MBSE 发展趋势与中国探月工程并行协同论证 [J]. *空间科学学报*, 2022, **42**(2): 183-190)
- [46] LIU Jizhong, GE Ping, KANG Yan, *et al.* Study on the construction scheme of mega interconnected knowledge systems in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, **11**(1): 79-89 (刘继忠, 葛平, 康焱, 等. 深空探测科学目标谱系构建方案探索 [J]. *深空探测学报 (中英文)*, 2024, **11**(1): 79-89)
- [47] YU Dengyun, ZHANG Zhe, PAN Binfeng, *et al.* Development and trend of artificial intelligent in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(1): 11-23 (于登云, 张哲, 泮斌峰, 等. 深空探测人工智能技术研究与展望 [J]. *深空探测学报*, 2020, **7**(1): 11-23)
- [48] YE Peijian, MENG Linzhi, MA Jinan, *et al.* Suggestions on artificial intelligence technology application and development in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(4): 303-316, 383 (叶培建, 孟林智, 马继楠, 等. 深空探测人工智能技术应用及发展建议 [J]. *深空探测学报*, 2019, **6**(4): 303-316, 383)
- [49] General Office of Lunar and Deep Space Exploration, CAS. Chang'E-3 mission: Chinese Academy of Sciences bravely shoulders the heavy responsibility[EB/OL]. (2013-12-03)[2025-07-31]. [https://www.cas.cn/zt/kjzt/ce3/jzjd/201312/t20131203\\_3989407.shtml](https://www.cas.cn/zt/kjzt/ce3/jzjd/201312/t20131203_3989407.shtml) (中国科学院月球与深空探测总体部. 嫦娥三号任务: 中科院勇挑重担 [EB/OL]. (2013-12-03)[2025-07-31]. [https://www.cas.cn/zt/kjzt/ce3/jzjd/201312/t20131203\\_3989407.shtml](https://www.cas.cn/zt/kjzt/ce3/jzjd/201312/t20131203_3989407.shtml))
- [50] China Meteorological Administration. Chang'E satellite project[EB/OL]. (2022-09-02)[2025-07-31]. [https://www.cma.gov.cn/ztbd/2022zt/20220901/2022090104/202209010402/202209/t20220902\\_5067007.html](https://www.cma.gov.cn/ztbd/2022zt/20220901/2022090104/202209010402/202209/t20220902_5067007.html) (中国气象局. 嫦娥卫星工程 [EB/OL]. (2022-09-02)[2025-07-31]. [https://www.cma.gov.cn/ztbd/2022zt/20220901/2022090104/202209010402/202209/t20220902\\_5067007.html](https://www.cma.gov.cn/ztbd/2022zt/20220901/2022090104/202209010402/202209/t20220902_5067007.html))

- [www.cma.gov.cn/ztbd/2022zt/20220901/2022090104/202209010402/202209/t20220902\\_5067007.html](http://www.cma.gov.cn/ztbd/2022zt/20220901/2022090104/202209010402/202209/t20220902_5067007.html)
- [51] LIU Jianjun, SU Yan, ZUO Wei, *et al.* Ground research and application system of China's first Mars exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(5): 414-425 (刘建军, 苏彦, 左维, 等. 中国首次火星探测任务地面应用系统 [J]. 深空探测学报, 2018, **5**(5): 414-425)
- [52] XING Yan, TENG Baoyi, HUANG Huang, *et al.* The technology of autonomous intelligent miniature robot and its application on lunar surface[J]. *Aerospace Control and Application*, 2024, **50**(6): 64-72 (邢琰, 滕宝毅, 黄煌, 等. 自主智能微小机器人技术及其月面应用 [J]. 空间控制技术与应用, 2024, **50**(6): 64-72)
- [53] ZHENG Yanhong, ZHANG Gao, DENG Xiangjin, *et al.* Design and implementation of the Chang'E-6 sampling and encapsulation system for the far side moon mission[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2025, **55**(7): 1182-1193 (郑燕红, 张高, 邓湘金, 等. 嫦娥六号月背采样封装系统设计与实现 [J]. 中国科学: 技术科学, 2025, **55**(7): 1182-1193)
- [54] HUANG Xiangyu, XU Chao, GUO Minwen. Research progress of autonomous navigation and control technology for extraterrestrial soft landing[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, **11**(1): 3-15 (黄翔宇, 徐超, 郭敏文. 地外天体软着陆自主导航与控制技术研究进展 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2024, **11**(1): 3-15)
- [55] ZHANG Rongqiao, ZHANG He, LIU Jianjun, *et al.* Tianwen-2 small bodies exploration mission[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2025, **55**(7): 6-15 (张荣桥, 张焯, 刘建军, 等. 天问二号小天体探测任务 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, **55**(7): 6-15)
- [56] Beijing Municipal Science and Technology Commission, Administrative Commission of Zhongguancun Science Park. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering[EB/OL]. (2024-01-05)[2025-07-02]. [https://kw.beijing.gov.cn/ztzl/rdzt/kpbj/kpjd/202401/t20240105\\_3799041.html](https://kw.beijing.gov.cn/ztzl/rdzt/kpbj/kpjd/202401/t20240105_3799041.html) (北京市科学技术委员会, 中关村科技园区管理委员会. 中国航天系统科学与工程研究院 [EB/OL]. (2024-01-05)[2025-07-02]. [https://kw.beijing.gov.cn/ztzl/rdzt/kpbj/kpjd/202401/t20240105\\_3799041.html](https://kw.beijing.gov.cn/ztzl/rdzt/kpbj/kpjd/202401/t20240105_3799041.html))
- [57] YANG Baoguang. Aerospace science outreach programs inspire the next generation's "space dreams"[EB/OL]. (2020-09-27)[2025-07-02]. [http://www.csu.cas.cn/gb/kxcb/202009/t20200927\\_5705948.html](http://www.csu.cas.cn/gb/kxcb/202009/t20200927_5705948.html) (杨宝光. 航天科普公益课为青少年开启“太空梦”[EB/OL]. (2020-09-27)[2025-07-02]. [http://www.csu.cas.cn/gb/kxcb/202009/t20200927\\_5705948.html](http://www.csu.cas.cn/gb/kxcb/202009/t20200927_5705948.html))
- [58] LIN D W, CRABTREE J, DILLO I, *et al.* The TRUST principles for digital repositories[J]. *Scientific Data*, 2020, **7**(1): 144

## 作者简介

**关 锋** 男, 1975 年出生, 硕士, 高级工程师. 研究方向为深空探测任务规划论证与组织实施.  
E-mail: [gaf98@sina.com](mailto:gaf98@sina.com)

**刘双良** 男, 1994 年出生, 博士, 中级工程师. 研究方向为深空探测任务规划论证与数字化.  
E-mail: [shuangliangliu@126.com](mailto:shuangliangliu@126.com)