

中图法分类号: V57 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2025)09-2951-15

论文引用格式: Hu J X, Zheng Q B, Zhu Y W, Wang P and Li Y C. 2025. Architecture and implementation of an intelligent simulation system for cislunar space awareness mission design and analysis. Journal of Image and Graphics, 30(9):2951-2965(胡佳鑫, 郑清标, 朱彦伟, 王鹏, 李永昌).
2025. 面向地月空间感知任务设计与分析的智能仿真系统架构与实现. 中国图象图形学报, 30(9):2951-2965[DOI:10.11834/jig.250183]

面向地月空间感知任务设计与分析的智能 仿真系统架构与实现

胡佳鑫^{1,2}, 郑清标^{3,4}, 朱彦伟^{1,2*}, 王鹏⁴, 李永昌⁴

1. 国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073; 2. 太空系统运行与控制全国重点实验室, 长沙 410073;
3. 航天工程大学宇航科学与技术系, 北京 101400; 4. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094

摘要: 目的 地月空间轨道普遍存在周期长、混沌性强、对各类扰动高度敏感等特征, 地月空间感知任务呈现出显著的动态变化和不确定性, 亟需借助虚拟仿真、仿真试验以及人工智能等先进技术手段开展科学研究与试验验证。**方法** 本文以地月空间感知任务设计与分析为牵引, 以服务化、标准化、国产化和工具化为理念, 基于“容器云+微服务”设计了满足高性能计算、高并发访问、多样化应用需求的“基础支撑+服务支撑+典型应用”3层智能仿真系统架构。分析了地月空间轨道动力学模型库、基于Kubernetes的计算任务智能调度和全链路微服务集成框架等关键技术。**结果** 研制了地月空间感知任务设计与分析仿真系统, 阐述了场景设计模块、态势感知系统设计与分析模块、任务规划模块、体系仿真模块、试验设计模块以及试验评估模块的实现情况。**结论** 通过应用案例说明, 仿真系统能够有效支持用户开展地月空间任务的正向设计以及方案的迭代优化, 高精度星历模型下15年驻留轨道积分能够达到分钟级计算性能, 具有高效性、智能性、稳定性和良好的扩展性。

关键词: 系统架构; 容器技术; 微服务技术; 地月空间; 三体轨道

Architecture and implementation of an intelligent simulation system for cislunar space awareness mission design and analysis

Hu Jiaxin^{1,2}, Zheng Qingbiao^{3,4}, Zhu Yanwei^{1,2*}, Wang Peng⁴, Li Yongchang⁴

1. College of Aerospace Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. State Key Laboratory of Space System Operation and Control, Changsha 410073, China; 3. Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101400, China; 4. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China

Abstract: Objective Conducting cislunar space awareness missions is critical for advancing deep-space exploration and ensuring the safe operation of spacecraft in complex space environments. However, the cislunar environment, characterized by gravitational interactions, dynamic properties of space objects, and multi-factor coupling effects, presents significant challenges that traditional experimental validation and trial-and-error methods struggle to address efficiently and precisely. In recent years, China's domestically developed aerospace simulation systems, such as the Aerospace Tool Kit developed by the National University of Defense Technology and the spacecraft system simulation software SpaceSim from Harbin Institute of Technology, have established autonomous technological frameworks that cover diverse mission types.

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-05-21; 预印本日期: 2025-05-28

* 通信作者: 朱彦伟 zywnudt@163.com

基金项目: 民用航天项目(KJSP2023020104)

Supported by: Civil Aerospace Technology Pre-research Project (KJSP2023020104)

Despite these advancements, specialized simulation solutions for deep-space exploration and cislunar space awareness remain underdeveloped, with limited integration of intelligent capabilities. The chaotic and nonlinear nature of the cislunar environment, combined with the dynamic variability and uncertainty inherent in perception tasks, imposes substantial demands on simulation system architectures, necessitating innovations in computational efficiency, adaptability, and scalability. To address these challenges, this study proposes a design philosophy that achieves modernization in four aspects: service orientation, standardization, domestic autonomy, and toolchain development. **Method** The service-oriented approach employs a “container cloud + microservices” architecture, integrating dynamic load-balancing algorithms and an intelligent task-scheduling engine to build an elastically scalable service platform capable of resolving high-concurrency multi-user parallelism. Standardization efforts focus on developing cross-platform interoperable middleware under a unified framework to address heterogeneous system integration and model generalization. For domestic autonomy, a fully independent technology stack is established using Phytium Advanced RISC Machine processors and the Kylin V10 operating system. The toolchain development adopts a “platform + plugin” design to enable dynamic model component loading and flexible functional module integration, supporting maintainable frontend/backend interfaces and adaptable resource allocation. These innovations culminate in a three-tier intelligent simulation architecture (“basic support + service support + typical applications”) that addresses the chaotic dynamics of cislunar space, the dynamic uncertainty of perception tasks, and the computational complexity of large-scale spatiotemporal simulations. Key technologies include a cislunar orbital dynamics model library, Kubernetes-based intelligent task scheduling, and an end-to-end microservice integration framework, which collectively resolve challenges in computational scheduling, service autonomy, and standardized model encapsulation. This feature enables efficient high-precision three-body orbit calculations, multi-user parallel response, and intelligent control of simulation workflows. The developed cislunar space awareness mission design and analysis simulation system incorporates six core modules. The first is the scenario design module, which leverages advanced technologies such as ThreeJS, WebGL, and Shader to address multi-view situational representation, multi-level spatial partitioning, multi-physical field visualization, multi-scenario synchronization, and multi-viewpoint navigation, achieving 3D visualization of large-scale spatiotemporal environments. The second is the situational awareness system design and analysis module, designed as a Cislunar Space System Tool Kits platform using ontological concepts to enable object-oriented system design and analysis capabilities, supporting iterative optimization through illumination analysis, orbital stability analysis, ground station visibility analysis, and target visibility analysis. The third is the mission planning module, which coordinates data transmission resources, tracking and control resources, and payload resources to generate integrated plans for data transmission, tracking, and payload operations. The fourth is the system-of-systems simulation module, enabling large-scale parallel simulations to validate design outcomes and mission workflows. The fifth is the experimental design module, which applies mature experimental design theories to generate effective combinations of test parameters and values, minimizing the test sample space. The sixth is the experimental evaluation module, which provides performance assessment and analysis for situational awareness tasks, allowing users to intuitively define and establish performance evaluation metrics. The system’s orbital dynamics model library encompasses four categories of 27 classical three-body orbits, such as halo, Lyapunov, and quasi-periodic orbits, supporting end-to-end mission phases from orbital design and control to target/environment simulation and capability evaluation. **Result** The design and analysis of a space-based cislunar space awareness system serve as a case study. A situational awareness constellation is designed, incorporating libration-point satellite orbital configurations and long-term orbital maintenance planning. High-precision orbit prediction is achieved for both near-lunar resident targets and cislunar transfer trajectories, with 15-year distant retrograde orbit and near-rectilinear halo orbit resident orbit integration under high-precision ephemeris models, demonstrating minute-level computational performance. Comprehensive planning of data transmission, tracking and control, and payload resources for the awareness constellation is executed. Simulation-driven 3D visualization and multi-dimensional performance evaluation of mission scenarios are conducted, ultimately yielding quantified mission effectiveness metrics for the space-based cislunar awareness system. **Conclusion** Case studies demonstrate the system’s ability to support forward design and iterative optimization of cislunar missions, exhibiting high efficiency, intelligence, stability, and scalability. On the basis of evaluation results, satellite orbital parameters (e.g., inclination, eccentricity) and constellation configurations (e.g., inter-satellite spacing, orbital phasing) are

dynamically adjusted to iteratively optimize mission plans, enhancing system performance and operational capabilities. This process ensures the scientific rigor and operational feasibility of designs while providing reliable technical foundations for subsequent engineering implementation, thereby solidifying its role as an important tool for advancing cislunar infrastructure development and deep-space exploration initiatives.

Key words: system architecture; container technology; microservice technology; lunar space; three-body orbit

0 引言

以美国的 Atermis 计划和我国的探月工程为代表,地月空间探索活动日益频繁,已成为人类活动新疆域、战略竞争新高地(张立华等,2019;张田等,2011)。开展地月空间感知任务不仅能够为深空探测提供重要的技术支撑,而且对保障航天器在复杂空间环境下的安全运行具有重要意义。发展地月空间感知技术,构建地月空间感知系统将成为增强天域感知能力的重要举措。然而,地月空间环境复杂多变,涉及引力相互作用、空间目标动力学特性以及多因素耦合效应等挑战性问题,传统的实验验证和经验试错方法已难以满足高效、精确的设计需求。

仿真技术作为覆盖论证、研发、试验、制造、训练和维护等全生命周期各阶段的增效赋能手段,在数字航天时代更显重要作用(包为民和祁振强,2024)。智能仿真系统作为一种新兴的综合设计与分析工具,能够通过高精度建模、实时数据处理和智能化优化算法,显著提升地月空间感知任务的设计效率与分析能力。借助智能仿真系统,研究者可以快速迭代验证不同设计方案,在虚拟环境中模拟真实场景下的任务表现,从而降低实验成本并缩短研发周期。同时,智能仿真技术能够对复杂的空间动力学问题进行深入解析,为任务规划提供科学依据,确保设计的科学性和可靠性,为未来的深空探测和空间资源开发奠定了重要基础,具有显著的技术价值和研究意义(郝万宏和李海涛,2008)。

当前航天系统仿真领域呈现多元化技术格局,国内外研究机构都已开发多类代表性仿真系统。其中美国的 AGI (Analytical Graphics) 公司开发的 STK (satellite tool kit) 凭借成熟的模块化架构和全生命周期覆盖能力占据市场主导地位,支持卫星轨道设计、通信链路分析以及空间环境建模等功能(丁溯泉等,2016)。STK 虽然没有专门的三体轨道动力学模型以及深空环境模块,但用户可以基于 STK 的 Astro-

gator 模块开展多引力环境下的轨道设计。STK 虽然功能强大,但由于属于闭源软件,无法开展定制化改造和二次开发利用。AGI 公司还基于 WebGL 开发了开源前端三维可视化平台 Cesium,可实现数字地球和卫星轨道的二三维可视化(苏昊翔等,2020)。Cesium 目前广泛应用于测绘领域,提供地理信息系统的前端显示界面,支持影像数据、地形数据以及矢量数据的动态地理空间可视化。GMAT (general mission analysis tool) 是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 开发的开源深空任务分析工具,支持轨道优化、姿态控制和多体动力学仿真,算法精度高且拓展性强(Barker等,2016)。GMAT 采用 C++ 语言开发,二次开发门槛较高,软件不支持 MATLAB、Java、JS (Javascript) 等主流语言集成。除此以外,欧洲商业软件 ASTOS (aerospace trajectory optimization software) 凭借轨迹优化算法、动力学方程、气动和推进系统数学模型等多类程序包套件,围绕航天任务全生命周期提供了多学科设计与分析工具支持(罗亚中等,2017)。NASA、法国航天局 (National Centre for Space Studies) 等机构联合开发了航天动力学开源库 Orekit,专注于航天任务分析的底层算法库,提供高精度轨道、姿态和事件预测工具,支持多体引力、大气阻力和太阳辐射压等摄动力模型,具有精度高、模块化和易拓展等特点,但缺乏图形界面,需要较高的编程基础(Cefola等,2013)。

近年来,国产航天仿真系统经过多年技术积累,已形成覆盖多类任务的自主技术体系。国防科技大学罗亚中团队自研的自主航天任务设计软件 ATK (Aerospace Tool Kit) 面向军事航天任务需求,实现了轨道动力学、姿态控制动力学、任务规划与优化等核心算法自主可控,支持以动态链接库形式集成插件(罗亚中和周建平,2024)。哈尔滨工业大学开发的航天器系统仿真软件 SpaceSim 通过图形处理器 (graphics processing unit, GPU) 加速与混合时间—事件驱动框架,实现了轨道动力学、姿态动力学、遥感、

通信和导航等功能模块,可完成航天器设计、测试、发射以及运控等全任务周期的仿真与验证(魏承等,2024)。中科星图测控技术股份有限公司研发了一套系统级的航天任务全周期分析软件,利用航天器高精度轨道、姿态、控制计算,测控资源智能筹划与调度,卫星全生命周期健康管理等核心技术,为航天任务设计、测试、发射、运行和应用提供专业的信息计算分析(罗亚中和周建平,2024)。北京航天慧海系统仿真科技有限公司开发的空天系统分析工具箱,实现了卫星仿真、空间网络资源规划分析、星座频谱兼容性分析等系列工具,为卫星应用与航天任务仿真提供分析服务(张莉和曾安里,2022)。

尽管国产化航天仿真系统发展迅速并取得了显著成果,但在深空探测领域和地月空间感知方向仍缺乏专业的仿真解决方案,且智能化赋能水平有待提升。由于地月空间环境具有混沌性和非线性特征,感知任务呈现出显著的动态变化和不确定性,这些都对仿真系统架构提出挑战,亟需借助集群管理、容器服务以及人工智能等先进技术手段开展。

本文面向工程总体、卫星总体和应用总体3类用户,设计了面向地月空间感知任务的智能仿真系统架构,集成了地月空间轨道动力学模型库,采用关键技术解决高精度三体轨道高效计算、多用户并行响应和仿真流程智能控制等问题,实现了场景设计、态势感知系统设计与分析、任务规划以及体系仿真等模块,为用户开展任务的正向设计以及方案的迭代优化提供了良好的系统与工具支持。

1 架构设计

地月空间动力学环境具有显著的混沌特性,这使得感知任务的设计与分析异常复杂。地月空间感知任务设计与分析主要面向工程总体、卫星总体和应用总体3类用户,开展包括体系设计与优化、方案设计、战法训法研究、任务全流程验证、多方案对比分析、多因素影响分析、性能指标优化以及作战效能评估等核心业务。为满足地月空间感知任务分析和仿真的多样化需求,系统需具备多场景管理、多模型集成、多方案对比、多参数优化、多模式验证以及综合效能评估等功能。结合国家关键技术自主可控的发展要求和服务航天工程应用的实际需求,面向地月空间感知任务设计与分析的仿真系统面临

的主要挑战包括多用户并行使用问题、异构仿真系统互联问题、国产自主可控环境要求和模型数据通用化要求。

针对上述技术挑战,本文提出服务化、标准化、国产化和工具化的“四化”设计理念。在服务化维度,采用容器化编排与微服务解耦的“容器云+微服务”架构,集成动态负载均衡算法与智能任务调度引擎,构建具备弹性扩展能力的服务中台,解决多用户高并发并行问题;在标准化方面,遵循统一的标准规范体系,构建跨平台互操作中间件,攻克异构系统互联与模型通用化难题;在国产化适配层面,构建基于飞腾 ARM 处理器与银河麒麟 V10 操作系统的全自主技术栈;在工具化支撑方面,采用“平台+插件”设计实现模型组件动态加载与功能模块自由组合,支持前后端可维护、资源灵活配置。通过“四化”创新设计,最终形成了“基础支撑+服务支撑+典型应用”3层智能仿真系统架构,如图1所示。

1) 后端支撑层。后端支撑层由硬件基础、容器云平台、平台服务以及模型与数据资源构成。为满足前后端分离架构需求、实现多操作系统适配,并确保系统的高并发响应能力,后端通过局域网将应用服务器、高性能计算服务器和存储服务器互联,构建私有小型集群。在此基础上,搭建基于 Kubernetes 与 Docker 的容器云服务平台,实现计算请求在集群中的动态负载均衡,充分释放集群的计算能力(张运德,2021)。通过引入 Istio 服务治理框架、Kafka 分布式消息队列、Zookeeper 分布式协调服务、Samba/NFS 文件共享服务以及 Nginx 服务容器,构建了完善的云服务平台,可为各类仿真资源提供注册、存储、查询、检索、提取、备份与恢复等服务功能。围绕地月空间感知任务需求,整合包括时空基准模型、经典限制性三体模型(如圆形限制性三体模型和双圆限制性四体模型)、高精度星历模型、Gaia 星表文件、历表文件 JPL(jet propulsion laboratory)、跳秒参数文件以及参数文件 EOP(earth orientation parameters)等基础模型与数据资源,构建了功能完善的后端服务群。这些服务为系统提供了高精度、高并发和可扩展的中台支撑能力,并为前端应用提供了可靠的数据与计算服务支持。

2) 中台服务层。中台服务层为地月空间感知任务的设计与分析提供全面的数据中台和业务中台支持。基于 Spring Cloud、Spring MVC、SpringBoot、MyBa-

tis、Dubbo、Swagger、Maven、Logback 等成熟的技术框架,构建了组件化应用开发集成环境,实现前后端分离架构下的功能模块独立开发与灵活部署,并支持组件的热插拔功能。针对地月空间感知任务的设计与分析需求,中台服务层以插件形式实现了多项核心功能:包括轨道设计相关的运行轨道设计、转移轨道设计和长周期轨道控制;任务设计层面的载荷配置与工作模式设计;以及任务分析模块中的轨道稳定性分析、地影/月影分析、太阳相位角分析、太阳遮蔽角分析、目标可见性分析和测站可见性分析等。系统预留了功能扩展接口,可满足未来更多业务需求的接入。数据中台对地月空间感知任务的全生命周期数据进行集中管控,提供数据处理、查询、分析、报表生成、对比研究和深度挖掘等服务,为任务设计与分析的持续优化提供可靠的数据支撑。同时,通过集成 WAF(web application firewall)、Nginx 反向代理、LVS(linux virtual server)负载均衡、Keepalived 高

可用性保障、JWT(JSON web token)认证机制等安全技术,构建了多层次的安全防护体系,确保系统入口的安全性和可靠性,并实现了单点登录和权限验证功能,为用户提供统一的门户服务(康晓海,2023)。

3)前端交互层。基于浏览器的任务设计与分析图形用户界面应用程序构建于前端交互层,充分整合后端支撑层与中台服务层所提供的集群计算能力和服务化业务封装功能。系统支持用户进行三体轨道目标的设计与地月空间环境的模拟,并实现感知任务的全流程仿真,为新技术与新装备的性能验证和探索性实验提供支持。借助服务化功能实现多设计方案的协同设计与对比分析,从而支撑正向设计方案的迭代优化与性能提升。此外,利用 WebGL、Three.js、VUE 等先进的图形渲染技术实现了地月空间环境可视化,能够在地月汇合坐标系下精准显示三体轨道,并为感知任务设计者提供直观的空间特性展示工具,有效辅助其理解复杂的地月空间环境。

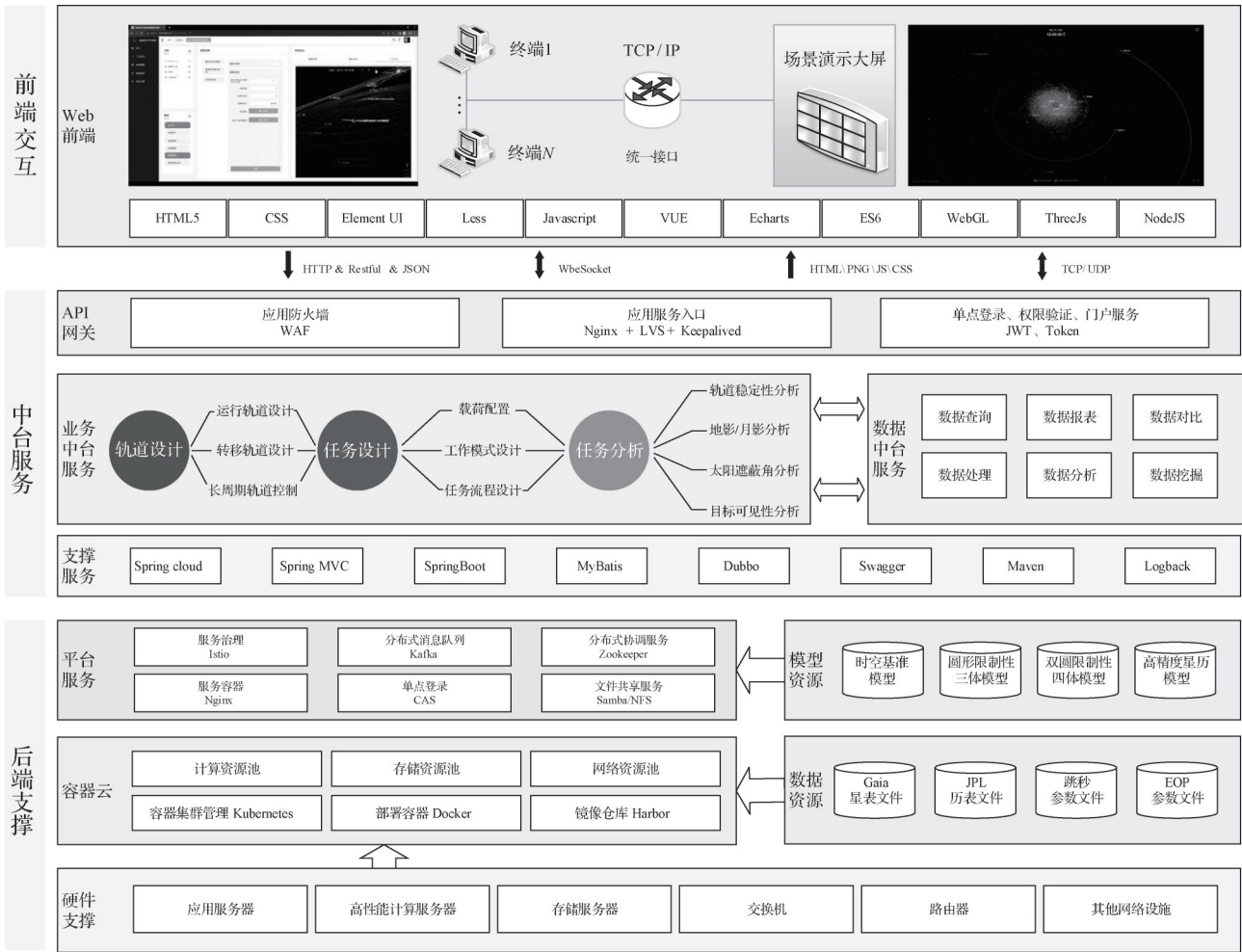


图 1 面向地月空间感知任务设计与分析的智能仿真系统架构图

Fig. 1 Intelligent simulation system architecture diagram for lunar-earth space awareness mission design and analysis

2 关键技术

针对地月空间动力学环境的混沌特性、感知任务的高度动态性和不确定性特征以及大尺度时空计算的高复杂度等问题,提出地月空间轨道动力学模型库、基于 Kubernetes 的计算任务智能调度技术和全链路微服务集成框架技术,实现高精度三体轨道高效计算、多用户并行响应和仿真流程智能控制。

2.1 地月空间轨道动力学模型库

地月空间环境的复杂性导致其呈现出高度混沌的状态特性。这种混沌状态的本质特征是对系统初始条件的高度敏感性:即使对目标当前位置或速度参数产生微小偏差,也会对其未来轨迹预测造成显著影响,这在动力学中称为“蝴蝶效应”。在这种非线性动力学体系中,系统的长期行为表现出不可预测性和随机性,给任务设计带来了严峻挑战。要开展地月空间感知任务设计与分析,必须精确模拟航天器在地月空间中的真实运动状态。因此,轨道动力学模型库是面向地月空间感知任务设计与分享的智能仿真系统核心部分。

地月空间轨道动力学模型库面向地月空间感知任务,从动力学模型角度可分为圆形限制性三体问题模型(circular restricted three-body problem, CRTBP)和高精度星历模型。CRTBP模型假设航天器在两个主天体引力的共同作用下运动,两个主天体围绕其公共质心做匀速圆周运动。该模型是平动点研究领域最为基本的动力学模型,对太阳系中大多数的三体系统都有较高的近似程度,在任务设计的初级阶段具有重要价值。双圆限制性四体模型假设日、地、月位于同一平面内,地球和月球围绕其公共质心做匀速圆周运动,地月质心围绕太阳做匀速圆周运动。使用双圆限制性四体模型是在圆形限制性三体问题模型的基础上增加太阳引力摄动后得到的。高精度星历模型,即限制性 N 体问题模型,考虑了太阳、所有行星和月球的引力以及太阳光压的作用。所有天体的位置由真实星历获得,隐含了诸如太阳引力摄动和月球轨道偏心率等因素,具有较高精度。采用真实星历数据的高精度星历模型可以充分考虑天体轨道偏心率和引力摄动等干扰力的影响,更为准确地刻画航天器在多天体引力场中的运动。

在研究地月空间运动时,平动点,即拉格朗日

点,作为限制性三体问题中的特殊解,具有重要的理论价值和应用意义。这些平动点是在随两个主天体一起绕行的非惯性参考系中实现动态平衡的位置,在航天器轨道设计中发挥着关键作用。其中,3个位于两天体的连线上,称为共线平动点,记为 L_1 、 L_2 和 L_3 ;另外两个分别和两天体构成等边三角形,称为三角平动点,记为 L_4 和 L_5 ,其周围大量存在周期和拟周期轨道(中心流形),以及与之联系的管状不变流形:周期/拟周期轨道是实现航天器长期运行的理想场所,而不变流形(包括稳定流形和不稳定流形)则提供了往返于主天体和周期/拟周期轨道之间的低能耗转移途径(彭坤等,2016;曾豪等,2021)。太阳系中不同三体系统的不变流形还存在相交的情形,从而拓展了系统间的深空转移轨道设计范围。当前一个时期内,地球附近的平动点具有较大应用价值,主要包括日地系统的 L_1 、 L_2 平动点和地月系统的5个平动点,如图2所示。

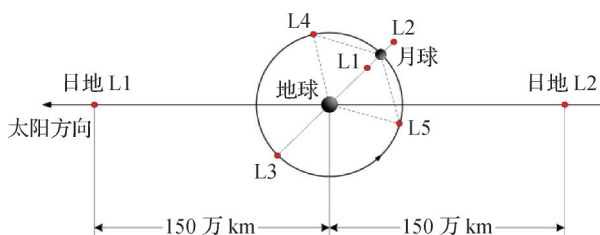


图2 地球附近的7个平动点

Fig. 2 Earth's nearby 7 Lagrange points

目前系统已实现的地月空间轨道类型涵盖:三角平动点轨道,包括短周期轨道、长周期轨道、垂直周期轨道以及拟周期轨道;共线平动点轨道,包括李萨如轨道、晕轨道、渐近稳定轨道、渐近不稳定轨道、可穿越轨道、不可穿越轨道;近月轨道,包括环月低轨、大偏心率冻结轨道、大幅值逆行轨道、近直线晕轨道(near rectilinear halo orbit, NRHO);地月间转移轨道,包括直接转移轨道、月球引力+不变流形的间接转移轨道、日—地—月动力学结构的间接转移轨道,如图3所示。

2.2 基于 Kubernetes 的计算任务智能调度技术

针对地月空间感知任务中的高并发计算需求以及高精度、大尺度时空计算的特点,对模型算法的计算任务调度提出严峻挑战。目前常用的3种任务调度模式包括集中式调度模式、分布式调度模式和混合式调度模式。其中,集中式调度模式由于存在计

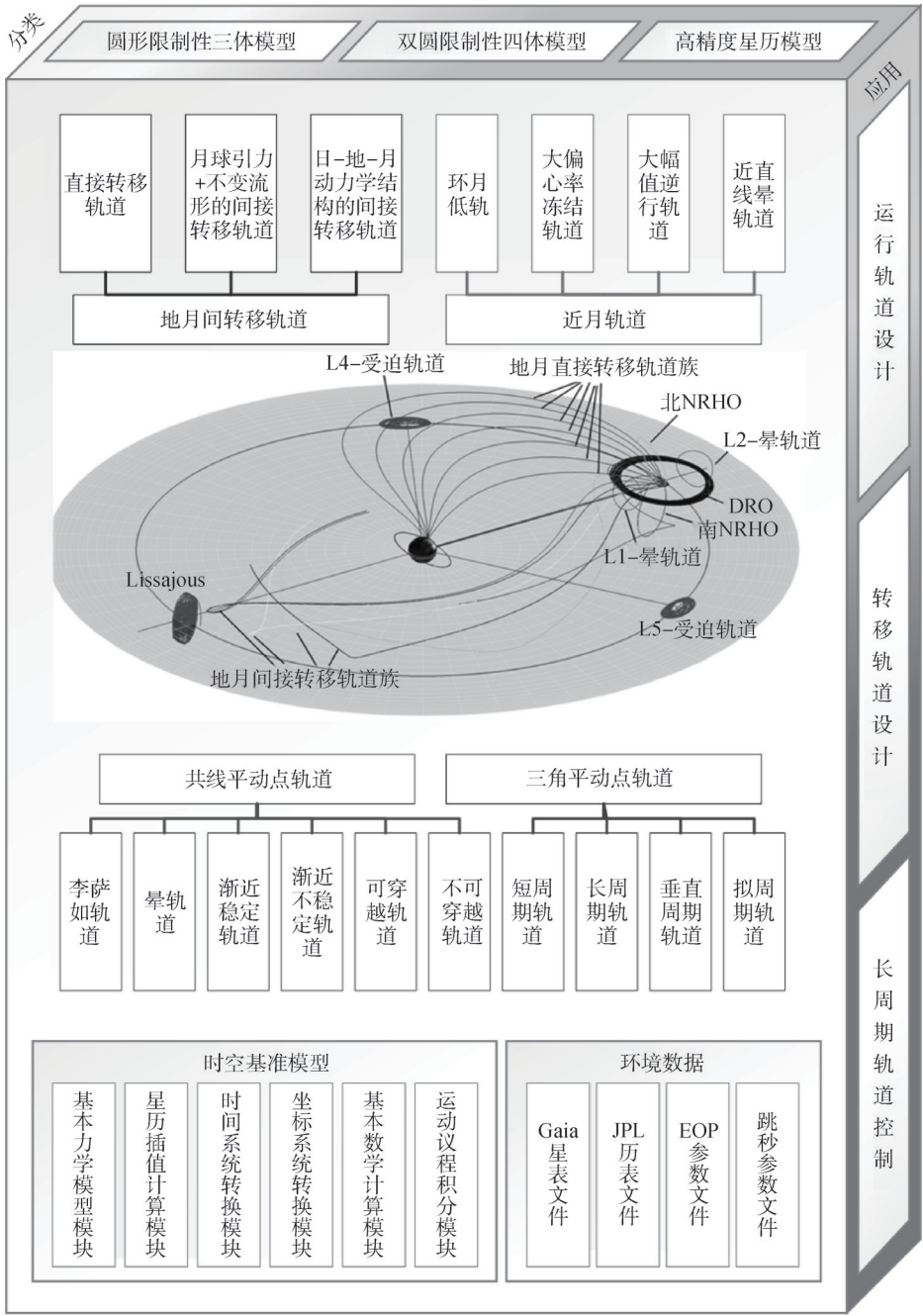


图 3 地月空间轨道动力学模型体系组成图

Fig. 3 Lunar-earth space orbital dynamics model composition diagram

算量分配不均等问题,容易导致资源瓶颈;而分布式调度模式通过每个节点与多个周边节点互联,展现出较强的容错性和良好的扩展性,但同时也伴随着较高的计算成本和较大的资源开销。

为克服前两种模式的局限性,系统采用混合式调度模式。该模式在单台服务器内部采用集中控制机制,在整个服务器集群层面则采取分布式架构,从而实现了资源利用率的最大化和系统可扩展性的显著提升。具体而言,以 Kubernetes 作为调度

中心的核心控制平台,通过快速解析用户的计算需求并触发调度决策(沈文枫 等, 2024)。同时依托执行器中心进行任务的实际处理工作,并支持根据负载动态调整执行器的注册与摘除操作,实现集群规模的弹性伸缩,如图 4 所示。此外,采用 RabbitMQ、Kafka 高性能消息队列技术,解决了不同节点之间大容量数据的交换与缓存问题。基于 Kubernetes 的计算任务智能调度技术不仅实现了任务调度的全异步化,还确保了系统的分布式部署能

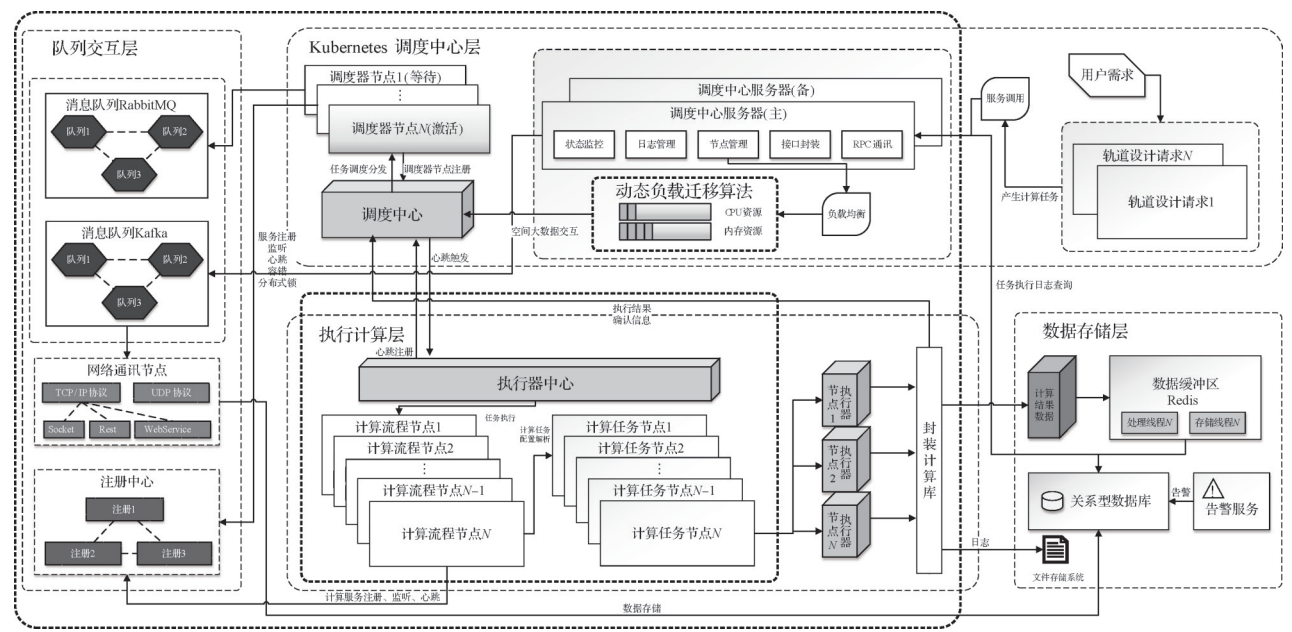


图4 计算任务智能调度逻辑视图

Fig. 4 Task calculation intelligent scheduling logic view diagram

力,为地月空间感知任务提供了高效可靠的计算资源管理方案。

2.3 全链路微服务集成框架技术

为满足地月空间感知任务设计与分析对多样化应用的需求,本文采用基于 Web Service 的标准化平台指令集成框架,并以 RESTful API 作为模型描述协议,对三体轨道设计、轨道控制等各类模型实现了标准化封装、集成与管理。这种基于协议的集成方式具有语言无关性和跨平台特性,能够有效支持多源异构系统的互操作性。在此基础上,针对高时效性的要求,系统构建了全业务链路的融合业务整合架构,打破了不同业务服务之间的功能壁垒,实现了对各类资源的充分调用与协同(Schindler 等, 2023)。服务集成框架提供服务托管、分布式协同、管理调度、实时监控以及熔断机制等功能,确保各类服务能够以高可靠的方式运行,服务集成框架数据流程如图5所示。

在服务运行机制方面,系统采用了微服务架构模式。各服务实例完成初始化后,会主动向服务注册中心进行注册。当服务 B 需要调用服务 A 时,服务注册中心将提供服务地址解析功能,使服务 B 能够准确找到所需的服务实例并建立通信链路。为确保高可靠性,每个服务通常部署多个运行实例。在分布式协同场景下,系统会自动发起选举机制:接收到选举消息的实例将参与投票,最终得票最高的实

例被选为主实例。主实例负责对需要仲裁的资源进行日志同步,并通过心跳机制定期向实例发送状态信息。若主实例发生故障导致心跳停止,系统将触发选举流程,由各备实例重新选出新的主实例,确保服务链路的连续性。在服务管理调度层面,系统支持灵活的服务路由编排功能,能够将各类服务有机串联,形成完整的业务长服务链。同时,服务状态监控模块实时跟踪各服务运行状态,一旦发现异常情况,将立即通知上游服务执行熔断机制,并在服务恢复后重新发起调用。必要时可通过降级接口实现服务的应急处理。系统不仅实现了各类模型和业务功能的标准化集成与高效协同,还构建了一个高可靠、可扩展的服务运行环境,为地月空间感知任务的设计与分析提供了强有力的技术支撑。

3 系统实现

面向地月空间感知任务的智能仿真系统按照功能分为6个核心模块:场景设计模块、态势感知系统设计与分析模块、任务规划模块、体系仿真模块、试验设计模块和试验评估模块。

3.1 场景设计模块

场景设计模块综合运用 ThreeJS、WebGL、Shader 等先进技术,解决地月空间环境的多视图态势表征、多层次空间剖分、多物理场表达、多场景同

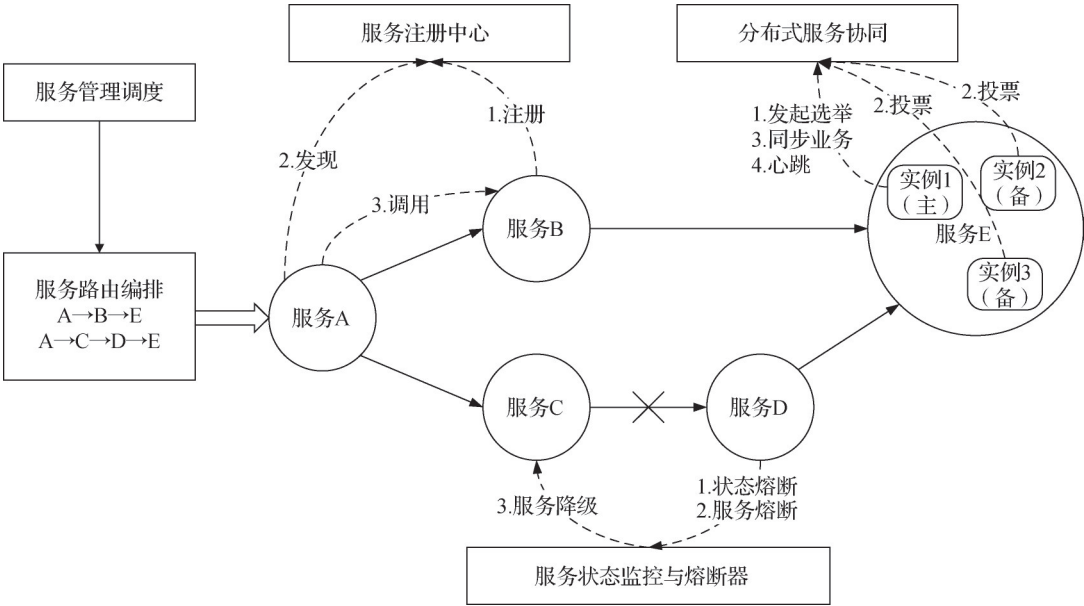


图5 微服务集成框架示意图

Fig. 5 Microservices integration framework schematic diagram

步以及多视点漫游等问题,实现了大尺度时空的三维可视化呈现,具备任务场景管理、任务对象编辑、任务场景预览和态势可视化等功能。模块提供三体轨道表征,支持J2000惯性系/月固系/地月汇合坐标系动态切换,L1/L2点附近航天器(包含大幅值逆行轨道与近直线晕轨道)在地月汇合坐标系下三体轨道可视化如图6所示。具备基于DE440真实星表加载与天体显示能力,支持环境数据分类呈现、实体高低模切换等功能。

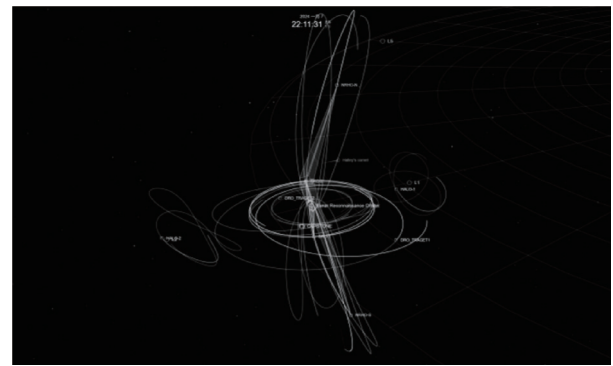


图6 L1/L2点附近三体轨道可视化

Fig. 6 L1/L2 point nearby three-body orbit visualization

3.2 态势感知系统设计与分析模块

态势感知系统设计与分析模块以“地月空间STK”为目标,采用本体论思想,实现了面向对象的系统设计与分析能力。针对卫星对象、平台对象、载荷对象、星座对象、地面站对象和目标对象,提供参

数化构建能力,支持层次化结构的对象组织方法。模块集成了高精度地月空间轨道动力学模型库,包括时空基准模块、轨道设计模块、转移轨道设计模块和轨道控制模块。时空基准模块提供基本力学模型、星历插值计算、地球定向矩阵、时间系统转换以及坐标系统转换。轨道设计方法实现了圆形限制性三体问题模型、星历模型,提供多重打靶短期星历参考轨道生成、二级微分校正短期星历参考轨道生成以及多重打靶拼接法长期星历参考轨道生成等功能(程尚鲈,2023)。以NRHO(near-rectilinear halo orbit)轨道设计为例,软件界面如图7所示。轨道控制方法提供真实力条件平动点轨道保持的LQR(linear quadratic regulator)方法、靶点法、滑模控制法、改进靶点法、X轴控制法(安诗宇,2022)等。转移轨道设计模块提供直接转移轨道设计、月球引力+不变流形间接转移轨道设计。

基于态势感知系统设计方案可开展光照特性分析、轨道稳定性分析、测站可见性分析和目标可见性分析等,实现方案迭代与优化的正向设计。测站可见性分析提供卫星或星座对地面测站的可见时段计算,支持多星多地站数据,支持地面站太阳高度角约束和地面站仰角约束配置、支持卫星和地面站约束关系的配置、支持卫星天线约束配置。轨道稳定性分析分为李雅普诺夫指数计算以及轨道维持计算。李雅普诺夫指数计算主要根据卫星轨道数据拟合状

态转移方程计算李雅普诺夫稳定性指数。轨道维持计算根据标称轨道数据计算轨道维持所需的速度增量。光照特性分析根据感知卫星或星座与目标、地球、月球和传感器的几何关系进行相关计算,分析深空环境、太阳光照等因素对感知任务带来的影响,支持太阳相位角、太阳高度角、太阳入射角、地影时段

和月影时段的计算,如图8所示。

像平面目标运动特性分析功能能够基于目标可见性进行计算,对于单颗或多颗卫星与一组目标的可见时段进行评估。结合卫星探测能力约束和目标特性限制,基于卫星轨道数据、目标位置信息、传感器视场角指向参数以及相位角等关键数据,精确模拟目标在

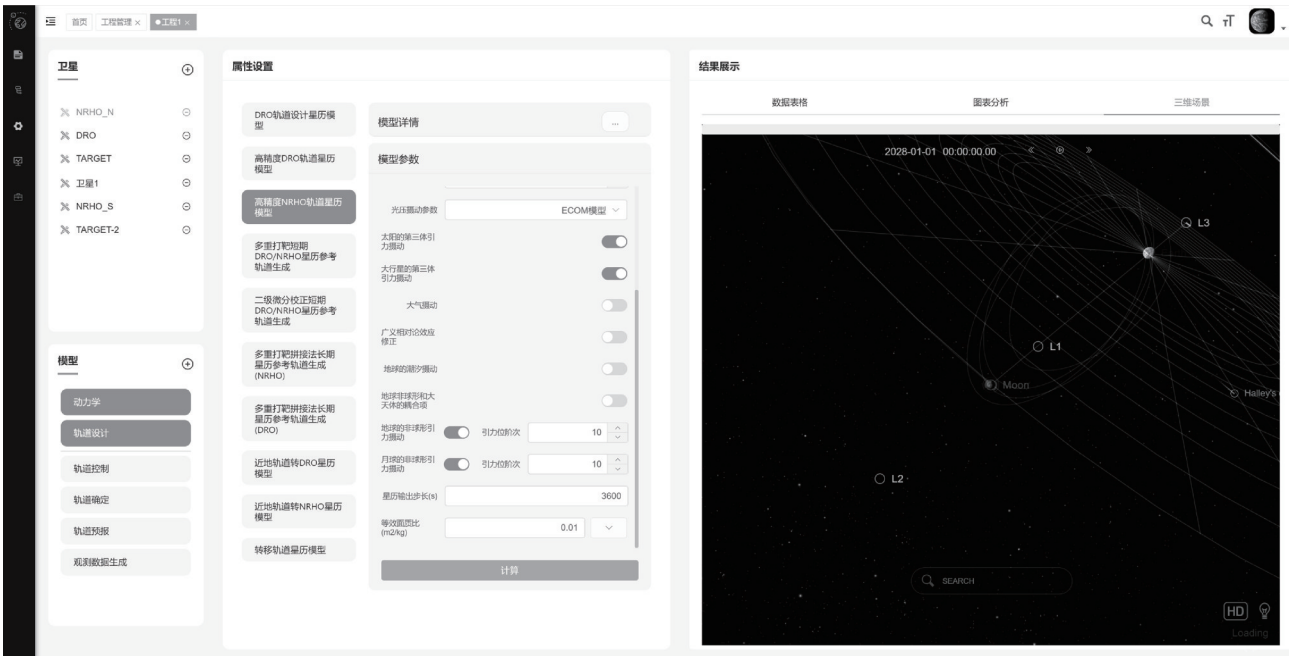


图7 NRHO轨道设计界面
Fig. 7 NRHO orbit design interface

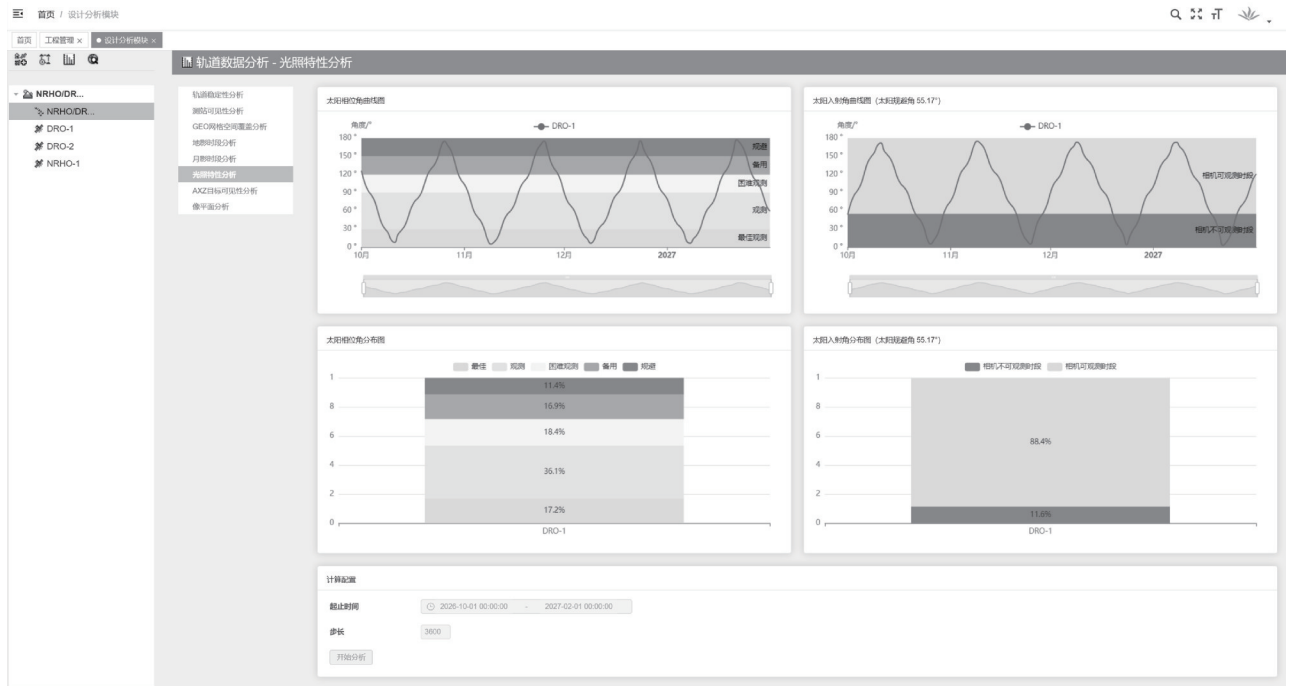


图8 光照特性分析界面
Fig. 8 Illumination characteristics analysis interface

相机视场中的相对位置及其运动关系,如图9所示。

3.3 任务规划模块

任务规划模块用于态势感知任务中根据系统设计方案开展数传资源、测控资源和载荷资源进行统筹规划,形成数传工作计划、测控工作计划和载荷工作计划。考虑不同用户偏好、不同任务样式等对规划规则的不同要求,区分载荷、平台和任务等不同层次,按照统一的规则表达方法构建基础共用任务规划规则库,并设计规则配置机制以

满足不同任务规划算法的需求,软件界面如图 10 所示。

3.4 体系仿真模块

体系仿真模块提供基于系统设计方案、卫星工作计划开展大样本并行仿真,对设计结果与任务流程进行仿真验证。遵循统一的仿真平台标准规范构建仿真模型和相关资源,支撑全任务流程仿真应用,按照用户设置的想定执行仿真推演。支持集中式仿真和分布式仿真、支持实时仿真数据采集、支

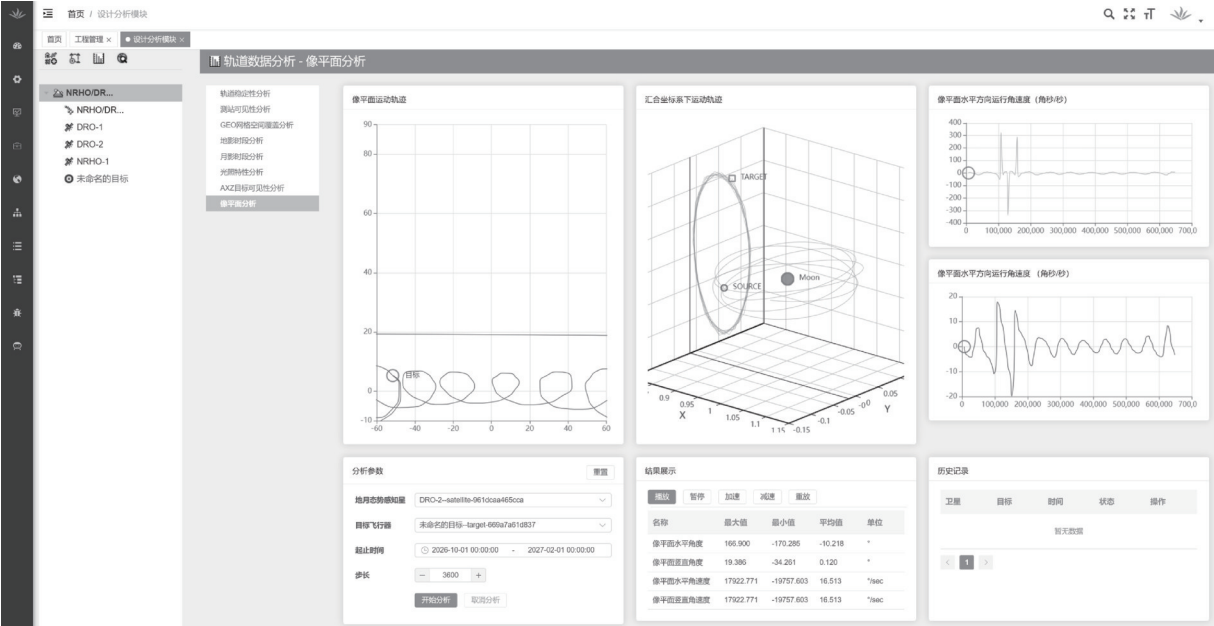


图9 像平面目标运动特性分析界面

Fig. 9 Image plane target motion characteristics analysis interface

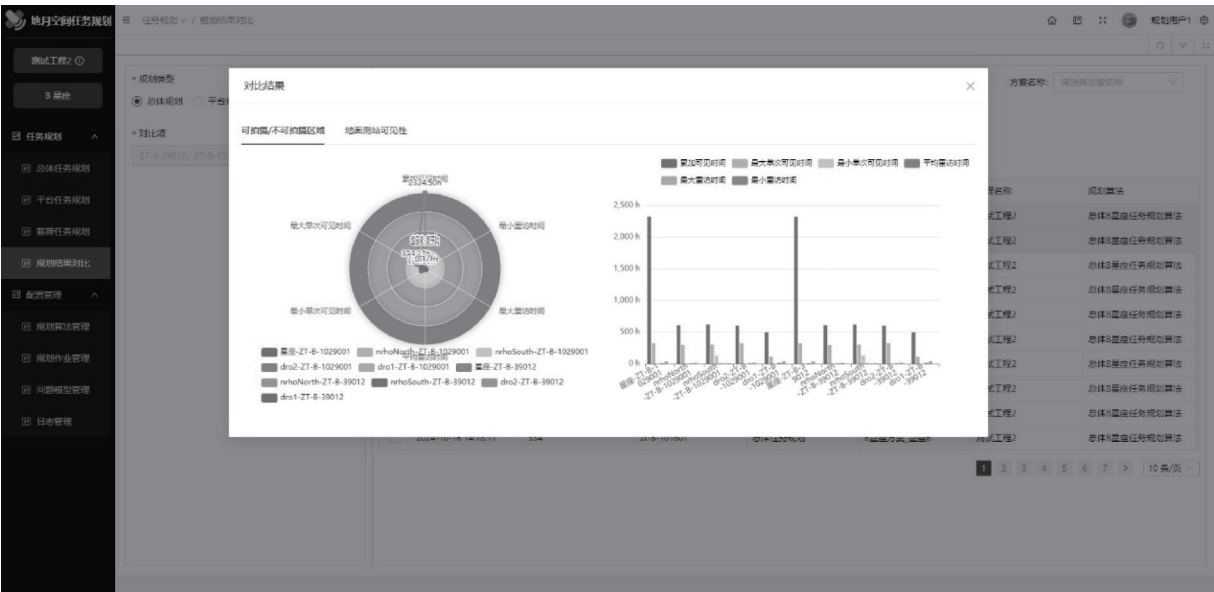


图10 任务规划模块界面

Fig. 10 Mission planning module interface

持仿真资源的管理和调度,充分利用智能任务调度引擎的并发能力,提高资源利用率,软件界面如图 11 所示。

3.5 试验设计模块

试验的影响因素众多,这些因素的所有取值组合构成了规模庞大的试验样本空间。试验设计模

块基于成熟的试验设计理论生成试验参数及其取值的有效组合,从而达到减少试验样本空间的目的。通过试验设计,不仅可以减少试验点的个数、节省人力和物力资源,而且可以使试验结果的分析有章可循,大大提高试验效率,软件界面如图 12 所示。

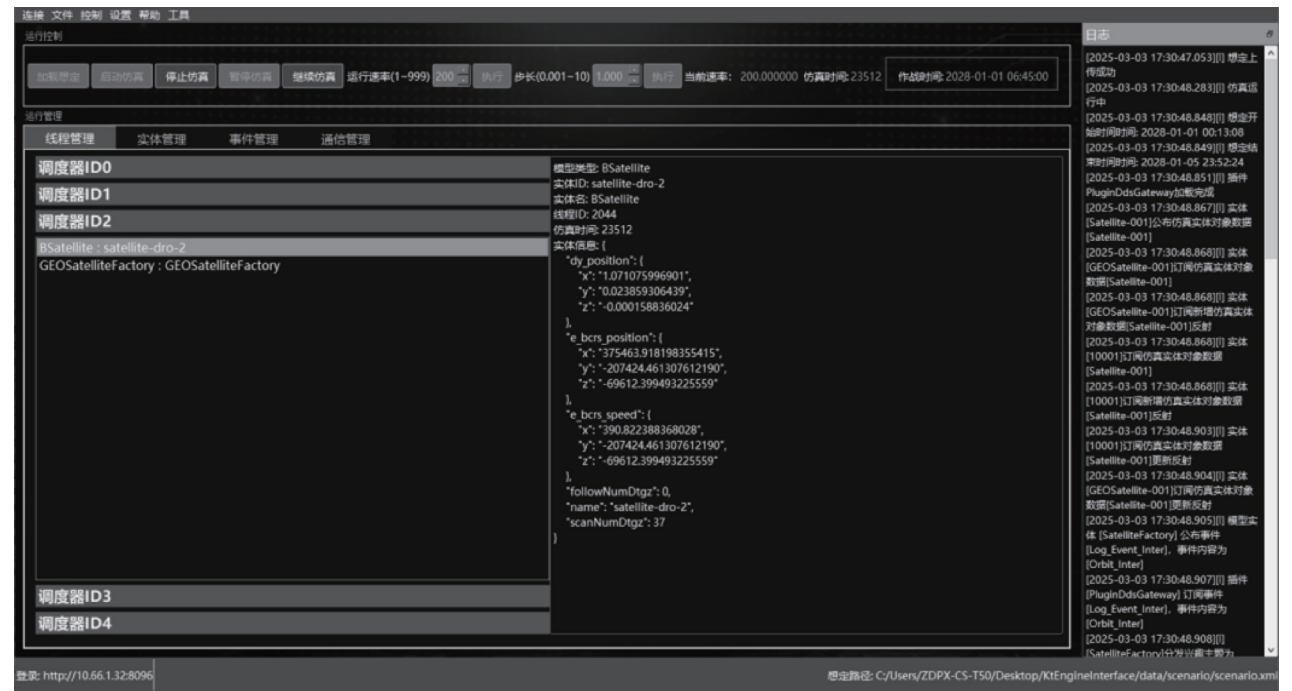


图 11 体系仿真模块界面
Fig. 11 SoS(system of system) simulation interface



图 12 试验设计模块界面
Fig. 12 Experiment design module interface

3.6 试验评估模块

基于仿真数据,试验评估模块提供态势感知任务的效能评估与分析,支持用户方便、直观和高效地定义效能评估指标,建立效能指标体系。通过调用

指标赋权、指标规范化以及指标聚合等方法实现综合效能定性和定量的评估,同时支持分析特定指标对效能的影响关系、重要性和变化规律,软件界面如图 13 所示。

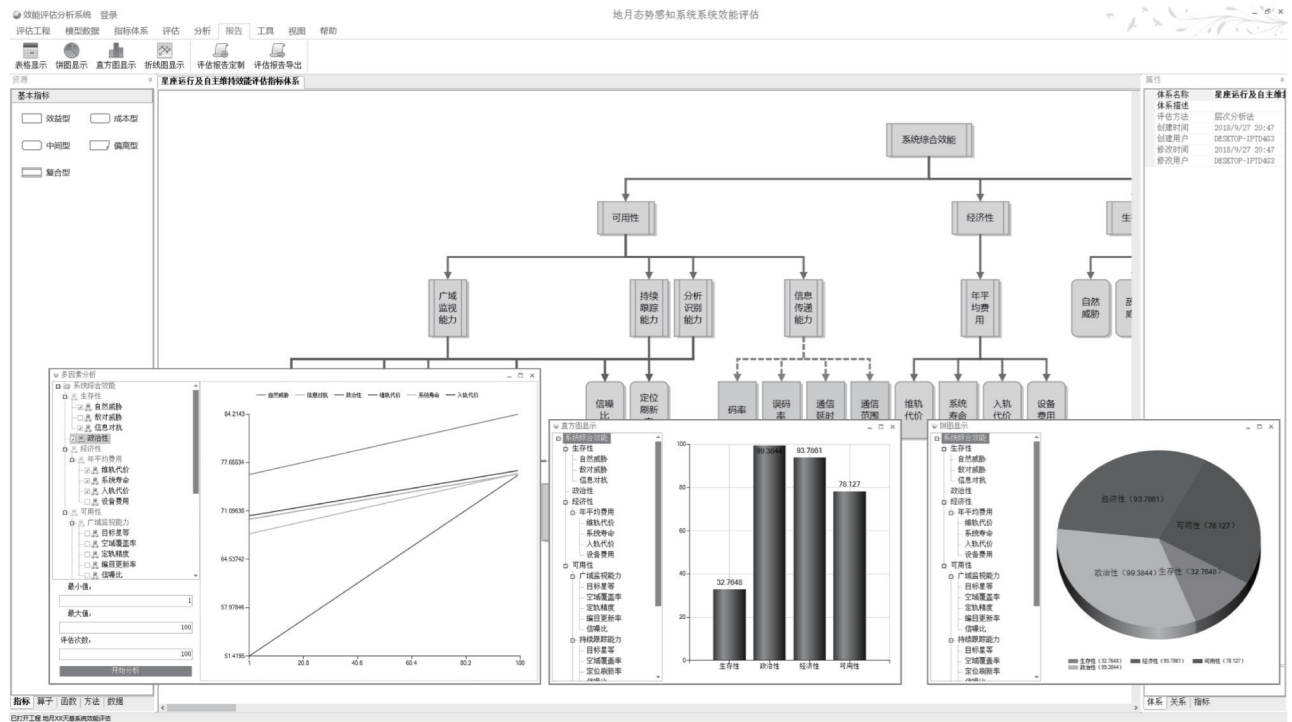


图 13 试验评估模块界面
Fig. 13 Experiment access module interface

4 应用案例

以天基地月空间感知系统的设计与分析为例,用户基于本文系统能够实现方案迭代与优化的正向设计能力,应用流程如图 14 所示。应用服务部署在国产服务器(飞腾 5000 芯片,ARM 架构),操作系统为银河麒麟 V10。具体步骤如下:

- 1)设计态势感知星座,构建多平动点卫星部署方案,开展平动点卫星运行轨道设计(以 DRO(distant retrograde orbit)/NRHO 轨道为例)。基于运行轨道开展长周期轨道维持规划,形成低能耗三体轨道控制方案。
- 2)设置地月空间目标,针对近月空间常驻目标以及地月空间转移轨道目标实现高精度轨道预报,高精度星历模型下 15 年 DRO/NRHO 驻留轨道积分能够达到分钟级计算性能。
- 3)感知约束条件设置,根据卫星与目标的几何

关系,设置太阳相位角、测站仰角和探测视场等约束,围绕近月目标覆盖性、地影/月影影响以及太阳遮蔽角等方面开展设计方案初步分析。

- 4)设计飞行任务规划,基于态势感知星座的运行轨道设计结果,计算近地到 DRO/NRHO 的低能转移轨道。
- 5)设计星座任务规划,针对态势感知星座的数传资源、测控资源和载荷资源进行统筹规划,分析不同工作模式的时空覆盖性。
- 6)设计试验方案,设置仿真试验的影响因子和采样水平,生成多个仿真试验样本。
- 7)启动体系仿真,通过智能任务调度,实现多个样本试验进程并行仿真,系统实时采集仿真过程数据,并针对态势感知系统业务进行仿真数据后处理。
- 8)显示场景与数据,场景设计模块基于仿真数据驱动可实现星族构型场景、搜索发现场景、视线引导场景以及编目管理场景的实时或事后可视化。
- 9)根据试验目标设计评估指标体系,基于仿真

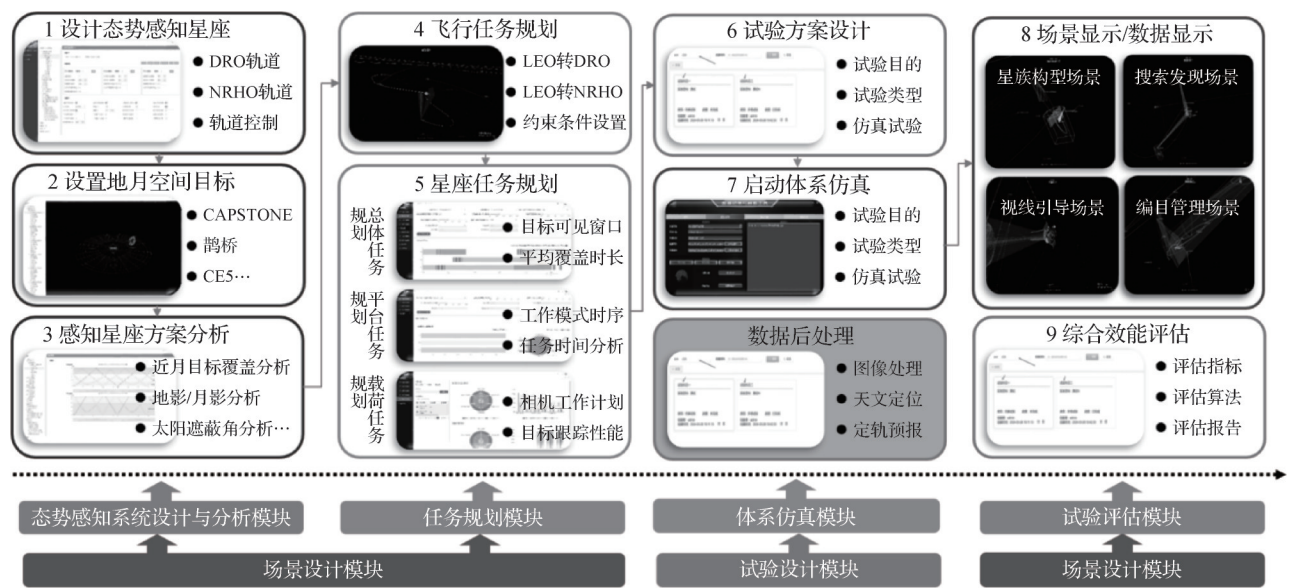


图 14 天基地月空间态势感知系统的设计与分析应用流程图

Fig. 14 Design and analysis application flowchart of space-based lunar-earth space situation awareness system

过程数据开展综合效能评估,最终获得天基地月空间感知系统的任务效能。

基于评估结果可重新调整卫星轨道参数和星座构型,完成方案迭代优化,达到感知系统的性能提升和任务能力增强。这一过程不仅保证了设计方案的科学性和合理性,也为后续工程实施提供了可靠的技术支撑。

5 结 论

本文针对地月空间感知任务设计、分析和仿真的多样化需求,设计了基于“容器云+微服务”的地月空间感知任务设计与分析智能仿真系统,有效填补了地月空间感知方向专业化工具链的技术空白。主要工作总结如下:1)提出服务化、标准化、国产化和工具化的设计理念,构建了“基础支撑+服务支撑+典型应用”的3层体系框架,实现模型组件动态加载与功能模块自由组合,支持前后端可维护、资源灵活配置。2)构建了地月空间轨道动力学模型库,涵盖4类27种典型三体轨道,满足地月空间感知任务从轨道设计到轨道控制、从目标模拟到环境模拟以及从任务设计到能力评估的全链路服务支持。3)采用基于 Kubermeter 的计算任务智能调度技术和全链路微服务集成框架技术,解决了复杂计算调度与服务自治、模型标准化封装与集成等核心问题,可有效支撑高性能计算、高并发访问和多样化应用需求。

下一步,地月空间感知任务设计与分析智能仿真系统将围绕“模型真、环境实、高可信、高智能、通用化”的目标进行持续迭代升级。

致谢:本文为第27届中国科协年会学术论文,感谢中国科学技术协会的支持。

参考文献(References)

An S Y. 2022. Orbital Design and Control of Sun-Earth L1 Mission Based on Invariant Manifold. Harbin: Harbin Institute of Technology (安诗宇. 2022. 基于不变流形的日地 L1 任务轨道设计与控制. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学)

Bao W M and Qi Z Q. 2024. Thinking of aerospace equipment systematization simulation technology development. Journal of System Simulation, 36(6): 1257-1272 (包为民, 祁振强. 2024. 航天装备体系化仿真发展的思考. 系统仿真学报, 36(6): 1257-1272) [DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0548]

Barker M K, Sun X, Mazarico E, Neumann G A, Zuber M T and Smith D E. 2016. Lunar phase function at 1064 nm from lunar orbiter laser altimeter passive and active radiometry. Icarus, 273: 96-113 [DOI: 10.1016/J.Icarus.2016.02.008]

Cefola P J, Bentley B L, Maisonobe L, Parraud P, Di-Costanzo R and Folcik Z. 2013. Verification of the Orekit Java implementation of the Draper semi-analytical satellite theory. Advances in the Astronomical Sciences 148 (2013): 3079-3110

Cheng S S. 2023. Design and Control of Cycler Orbit and Libration Point Periodic Orbit in Earth-Moon System. Harbin: Harbin Institute of Technology (程尚稣. 2023. 地月循环及平动点周期轨道设计与控制研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学)

- Ding S Q, Zhang B, Liu S Y and Shi S B. 2016. STK Usage Skills and Applications in Manned Space Engineering. Beijing: National Defense Industry Press (丁溯泉, 张波, 刘世勇, 石善斌. 2016. STK使用技巧及载人航天工程应用. 北京: 国防工业出版社)
- Hao W H and Li H T. 2008. Space VLBI Application Based on L4 and L5//Proceedings of the 5th Deep Space Exploration Symposium. Changsha: Chinese Society of Astronautics: 73-76 (郝万宏, 李海涛. 2008. 拉格朗日点 $L_4, 5$ 在空间 VLBI 中的应用//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第五届学术年会论文集. 长沙: 中国宇航学会: 73-76)
- Kang X H. 2023. Design and Implementation of Aerospace Cloud Resource Management System Based on Service Choreography. Beijing: Beijing Jiaotong University (康晓海. 2023. 基于服务编排的航天云资源管理系统的设计与实现. 北京: 北京交通大学)
- Luo Y Z, Sun Z J and Qiao D. 2017. Survey of astrodynamics software development. Mechanics in Engineering, 39(6): 549-560 (罗亚中, 孙振江, 乔栋. 2017. 航天动力学软件发展评述. 力学与实践, 39(6): 549-560) [DOI: 10.6052/1000-0879-17-248]
- Luo Y Z and Zhou J P. 2024. Development strategic analysis for space mission analysis and design industrial software. Mechanics in Engineering, 46(2): 241-249 (罗亚中, 周建平. 2024. 航天任务分析与设计工业软件发展战略分析. 力学与实践, 46(2): 241-249) [DOI: 10.6052/1000-0879-24-032]
- Peng K, Li M T, Wang P, Tian L, Guo L L and Yang L. 2016. Transfer trajectory design for EML2 Halo orbit based on invariant manifolds. Manned Spaceflight, 22(6): 673-679, 749 (彭坤, 李明涛, 王平, 田林, 果琳丽, 杨雷. 2016. 基于不变流形的地月 L2 点 Halo 轨道转移轨道设计. 载人航天, 22(6): 673-679, 749) [DOI: 10.3969/J.Issn.1674-5825.2016.06.002]
- Schindler C, Knieke C, Rausch A, Douglas E and Chiadjeu N. 2023. Towards transforming OpenAPI specified web services into planning domain definition language actions for automatic web service composition//Proceedings of the 15th International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications (ADAPTIVE). Nice, France: IARIA: 15-21
- Shen W F, Deng R, Liu Z S, Du Y H and Lu W J. 2024. An industrial AI project development platform based on Kubernetes. Computer Applications and Software, 41(5): 15-20, 48 (沈文枫, 邓荣, 刘政森, 杜雨航, 陆唯佳. 2024. 基于 Kubernetes 的工业 AI 项目开发平台. 计算机应用与软件, 41(5): 15-20, 48) [DOI: 10.3969/J.Issn.1000-386x.2024.05.003]
- Su H X, Dong Z H, Yang F and Liu L H. 2020. Visual simulation analysis platform for satellite load based on Cesium. Computer Engineering, 46(10): 193-200 (苏昊翔, 董正宏, 杨帆, 刘立昊. 2020. 基于 Cesium 的卫星载荷可视化仿真分析平台. 计算机工程, 46(10): 193-200) [DOI: 10.19678/J.Issn.1000-3428.0058400]
- Wei C, Qiao B, Liu T X, Zhao H and Cao X B. 2024. Design and application of SpaceSim: a spacecraft system simulation software. Journal of Astronautics, 45(11): 1724-1731 (魏承, 乔彬, 刘天喜, 赵晗, 曹喜滨. 2024. 航天器系统仿真软件 SpaceSim 设计与应用. 宇航学报, 45(11): 1724-1731) [DOI: 10.3873/J.Issn.1000-1328.2024.11.003]
- Zeng H, Li Z Y, Xu R, Hao P and Peng K. 2021. Round-trip transfers to Earth-Moon DRO and Halo for supporting lunar exploration. Journal of Astronautics, 42(12): 1483-1492 (曾豪, 李朝玉, 徐瑞, 郝平, 彭坤. 2021. 地月 Halo 与 DRO 支持的往返月球任务轨道. 宇航学报, 42(12): 1483-1492) [DOI: 10.3873/J.Issn.1000-1328.2021.12.001]
- Zhang L and Zeng A L. 2022. Aerospace Huihai: domestic VVP space system analysis toolbox "1+4 Swords". Software Guide, 21(10): 249-252 (张莉, 曾安里. 2022. 航天慧海: 国产 VVP 空间系统分析工具箱"1+4把剑". 软件导刊, 21(10): 249-252)
- Zhang L H, Wang P and Zhang Y. 2019. Expand spacecraft's applications based on Earth-Moon Libration point orbit resource. Spacecraft Engineering, 28(3): 1-7 (张立华, 王鹏, 张燕. 2019. 利用地月平动点轨位资源拓展航天器应用. 航天器工程, 28(3): 1-7) [DOI: 10.3969/J.Issn.1673-8748.2019.03.001]
- Zhang T, Sun Y K and Tang Z S. 2011. Visualization of the distribution of the solar wind ion flux data above the moon surface based on Chang'E-1 exploration. Journal of Image and Graphics, 16(3): 488-494 (张田, 孙延奎, 唐泽圣. 2011. 嫦娥一号太阳风离子数数据在月表分布的可视化. 中国图象图形学报, 16(3): 488-494) [DOI: 10.11834/jig.20110328]
- Zhang Y D. 2021. Design and implementation of Beidou simulation system based on domestic container cloud platform. Journal of Information Engineering University, 22(1): 51-54 (张运德. 2021. 基于国产容器云平台的北斗仿真系统设计与实现. 信息工程大学学报, 22(1): 51-54) [DOI: 10.3969/J.Issn.1671-0673.2021.01.009]

作者简介

胡佳鑫,男,讲师,主要研究方向为地月空间体系仿真。

E-mail: joehu1989@163.com

朱彦伟,通信作者,男,教授,主要研究方向为航天器轨道博弈动力学与控制、空天任务规划与体系仿真、地月空间系统总体与仿真试验。E-mail: zywnudt@163.com

郑清标,男,研究员,主要研究方向为卫星总体设计。

E-mail: dfhzheng2024@163.com

王鹏,男,研究员,主要研究方向为地月空间感知系统设计。

E-mail: 13911574704@139.com

李永昌,男,高级工程师,主要研究方向为地月空间感知系统设计。E-mail: liyongchang1231@163.com