

# “鹊桥”通导遥星座系统运行控制与运营管理技术

刘莹<sup>1,3</sup>, 刘鹏<sup>2</sup>, 赵靛<sup>1,3</sup>, 刘忠良<sup>1,3</sup>, 韩洪波<sup>2</sup>,  
吴贻伟<sup>1,3</sup>, 李欣阳<sup>2</sup>, 梁宗闯<sup>1,3</sup>, 李鸿飞<sup>2</sup>, 向开恒<sup>1,3</sup>

(1. 深空探测实验室, 合肥 230026; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 10094;  
3. 深空探测全国重点实验室, 合肥 230026)

**摘要:** 面向星座与用户超大空间尺度分布、通导遥异构业务深度融合与服务质量管理等全新挑战, 提出一种“地月协同-国际联合”的运行控制与运营管理体系架构。针对星地管控时延大、多业务资源竞争冲突、国际异构系统协同难等核心问题, 构建了融合星座控制、网络管理、资源调度、数据治理与业务服务的一体化功能框架, 并建立贯穿地基运控、星地协同与月基智能响应的多层次运行模式。在此基础上, 设计了以“采集-能力-支撑-应用-服务”为核心的 5 层系统技术架构, 以支持功能模块与能力服务的灵活复用与高效集成。可为中国后续月球及深空探测任务的通导遥系统建设与高效可靠管控提供理论依据与工程实现路径, 推动地月空间信息基础设施向智能、开放与商业化的方向发展。

**关键词:** “鹊桥”星座; 地月协同; 运行控制; 网络管理

**中图分类号:** V55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2025)04-0412-10

**DOI:** 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250079

**引用格式:** 刘莹, 刘鹏, 赵靛, 等. “鹊桥”通导遥星座系统运行控制与运营管理技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(4): 412-421.

**Reference format:** LIU Y, LIU P, ZHAO J, et al. Operation and management technology of Queqiao communication, navigation and remote sensing constellation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(4): 412-421.

## 引言

月球是人类拓展生存疆域、验证深空技术、探寻资源潜力的“试验场”, 目前已成为国际探测和开发的重点。随着各国月球探测任务的密集推进, 月球与深空的探测目标将由月球探测转变为深化月球科学研究与综合开发利用月球资源<sup>[1-2]</sup>, 形成以载人登月、无人探月、资源开发利用和技术验证为核心的立体化发展格局。为保障与日俱增的地月空间及月球以远深空通信与导航需求, 各国纷纷提出其地月空间通导遥基础设施建设规划<sup>[3]</sup>, 以美国“月球通信导航网络架构”(LunaNet)<sup>[4-7]</sup>、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)“月光”(Moonlight)计划<sup>[8-10]</sup>、日本“月球导航卫星系统”(Lunar Navigation Satellite System, LNSS)等为代表的地月空间基础设施系统, 已逐步从规划向实践落地发展。

中国依托“嫦娥”工程已完成“鹊桥”“鹊桥二号”中继星的部署, 并面向未来地月空间网络建设,

发射了“天都一号”“天都二号”月球通导技术试验星<sup>[11]</sup>及地月空间远距离逆行轨道(Distant Retrograde Orbit, DRO)三星星座<sup>[12]</sup>开展相关的关键技术验证。面向未来探月工程深入开展载人登月、国际月球科研站等大规模月球探测任务实施需求, 中国正在布局“鹊桥”通导遥星座系统(后续简称“鹊桥”星座)建设, 为月球与深空探测活动提供高速实时通信保障、高精度导航定位授时、高效态势感知及在轨信息服务等多类型服务。

地月通信导航建设从单星部署逐步向网络化发展, 呈现出通信能力显著提升、导航定位更加精准、多元业务大量兴起、国际合作不断深化的发展趋势。这将打破传统月球与深空探测任务地面支持的模式, 形成天地协同、全球联合的分布式布局体系, 从“地球依赖性”运行保障逐渐转变为“天地一体”联合运营支持、从各国独立实施转变为国际合作探索, 以实现各类资源的高效整合与调配。

目前, 各国月球通导遥星座系统的建设处于起步

阶段, 其运行控制与运营管理体系和模式尚处于规划阶段, 而近地卫星通信、导航、遥感星座已形成了规模化的运行态势, 如“国网”(GW)星座<sup>[13-14]</sup>的天地联合测控体系, “北斗”卫星导航系统<sup>[15-16]</sup>的主控站、注入站、监测站与低轨/地基增强系统联合控制体系, 国家高分辨率对地观测系统重大专项立体化遥感观测和服务响应架构<sup>[17]</sup>和正在发展的非地面网络(3rd Generation Partnership Project Non-Terrestrial Networks, 3GPP NTN)技术框架<sup>[18-22]</sup>, 均可为月球通导遥星座系统运行控制与运营管理体系的研究和建设提供借鉴。

本文提出了“鹊桥”星座运行控制与运营管理体系概念与定义, 通过分析正在开展的探月四期、规划中的载人登月、国际月球科研站大科学工程等任务需求, 设计基于“鹊桥”星座的一体化运行控制与运营管理技术方案, 明确了系统功能、组成和接口体系, 为后续发展建设提供理论依据和技术支撑。

## 1 概念设想

地月空间通导遥基础设施具有节点大尺度分布、轨道高度异构的特点。文献[23]面向月球探测月面全空域、全时域覆盖的通信需求, 确定中继通信并融合近月空间子网和近地空间子网的地月空间信息网络体系架构为最优方案。文献[24]基于地月网络高动态、大时延、强异构的特点, 提出地月云网架构, 采用域内自治、域间互联策略, 以适应地月空间特征并满足未来深空探测网络节点互联的需求。文献[25]针对载人月球探测任务详细分析地月一体化的网络需求, 提出了涵盖月地网、环月网、月面网三网一体的地月一体化网络, 设计了一体化、分层化、通用化、标准化的网络协议架构。本文结合上述星座架构设计, 从功能视角, 将“鹊桥”星座划分为卫星星座段、运行支持段和系统用户段, 星座架构设想如图1所示。

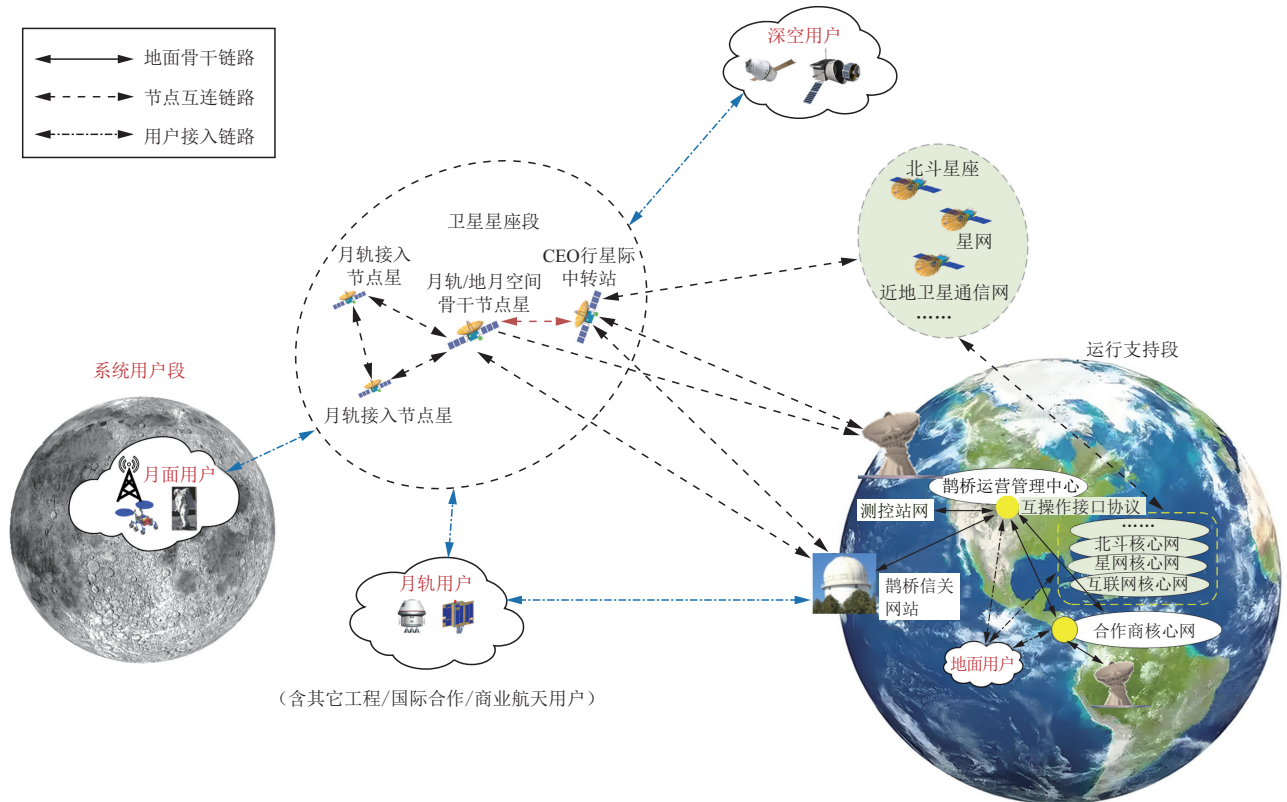


图1 “鹊桥”星座总体架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the architecture of Queqiao constellation

卫星星座段通过在骨干节点星、接入节点星搭载通信、导航、遥感与信息服务等多种载荷, 实现数据通信服务、定位、导航和定时(Positioning Navigation, and Timing, PNT)服务、遥感测绘与感知服务等功能。系统用户端作为星座服务主体, 广泛分布于

地面及近地空间、地月空间、月面及深空空间, 包括人、站、器星等各类用户。运行支持段主要开展对卫星星座段和系统用户段的运行控制与运营管理, 保障“鹊桥”星座自身长期稳定运行, 并为其提供通导遥服务支持。

## 2 需求分析

未来“鹊桥”星座系统将成为月球空间的关键基础设施，主要支撑三类核心任务。

1) 载人登月与月面活动：为宇航员月面驻留、舱外活动、月面载具巡航提供实时连续的通导服务，并支持月面设施建设的遥感监测。

2) 国际月球科研站与国际合作：为分布于月面/月轨的多国科学载荷提供数据中继与导航定位服务，支撑能源、数据传输等站务管理的协同调度。

3) 月球以远深空探测：作为面向火星、金星及小行星等行星任务的深空通信中继网关，提供高速数传和测控支持。

各核心任务典型场景对星座性能需求如表1所示。为服务以上核心任务场景并保障星座长期稳定运行，

星座运行控制与运营管理系统应满足的功能和性能需求包括：长期近实时测控，支持对多探测器、多设施的并行全时测控管理，及其对月球空间用户的中继测控，实现遥测数据采集、状态监测和指令上注的近实时处理；高速网络化通信，支持星座与用户科学数据、中继数据的Gbit/s级高速数据落地，及其软件更新、数据库维护等大容量运维数据的可靠传输，保障载人登月视话通信，为用户提供按需接入、动态资源调整的网络化通信服务；高精度导航定轨授时，支持对星座的米级高精度自主轨道确定与保持，支持星间/星地协同的百纳秒级时间一致性维持，为全月及地月空间用户提供全域覆盖的实时、连续、可靠的导航定位服务；遥感与在轨信息服务，建立用户驱动的自动化载荷任务规划、数据获取生产和共享分发能力，满足科研与工程应用对遥感数据的时效性与质量要求。

表1 “鹊桥”星座通导遥服务保障需求

Table 1 Queqiao constellation communication, navigation, and remote sensing service support requirements

核心任务场景	入网终端数量设想	用户通导遥服务保障需求		
		通信指标设想	导航指标设想	遥感指标设想
载人登月与月面活动	<ul style="list-style-type: none"> <li>航天员≥2</li> <li>月面活动设备≥10</li> <li>月面固定设备≥5</li> <li>轨道器≥2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>数传通信速率≥100 Mbit/s<sup>[15]</sup></li> <li>业务中断时间~秒级</li> <li>通信可用度&gt;99.9%</li> <li>日均数据量~1 TB级</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>月面定位精度&lt;10 m<sup>[15]</sup></li> <li>授时精度~μs级</li> <li>导航可用度&gt;99.9%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>空间分辨率：0.1~0.5 m</li> <li>时间分辨率：~日级</li> <li>模式：可见光、 红外成像探测； 雷达成像探测</li> </ul>
国际月球科研站与国际合作	<ul style="list-style-type: none"> <li>月面活动设备≥100</li> <li>月面固定设备≥10</li> <li>轨道器≥20</li> <li>航天员≥2 (短期)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>数传通信速率&gt;500 Mbit/s</li> <li>业务中断时间~小时级</li> <li>日均数据量~10 TB级</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>月面定位精度&lt;10 m</li> <li>地月空间定位精度&lt;50 m<sup>[15]</sup></li> <li>授时精度~100 ns级</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>空间分辨率：0.5~20 m</li> <li>时间分辨率：~月/季度</li> <li>模式：微波/粒子/光学等</li> </ul>
月球以远深空探测活动	<ul style="list-style-type: none"> <li>轨道器&gt;10</li> <li>星表活动设备&gt;5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>数传通信速率≥10 Mbit/s</li> <li>日均数据量≤1 GB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>定位精度~百米级<sup>[26]</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>模式：光学/射电天文观测</li> </ul>

中国依托探月工程与行星探测工程已建立了以北京航天飞行控制中心为运控中心，深空测控站、甚长基线干涉测量技术 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、数传应用站联合的深空测控通信体系，并保障了历次深空探测任务的顺利开展。面向未来任务，目前运行控制与运营管理能力需求缺口如表2所示。

从表2可见，目前运行控制与运营管理能力仍有较大缺口，亟需研究基于“鹊桥”星座的运行控制与运营管理体系，助力提高星座对深空探测活动的在轨支持与决策支撑、科学数据管理与服务能力及星座长期稳定运行等能力，为未来中国开展月球探测与科研活动、国际月球科研站建设及迈向更远深空等任务提供通导遥支撑保障。

## 3 体系方案设计

### 3.1 “地月协同-地面联合”一体化体系架构

本文从服务和支撑月球探测人、站、轨道器、着陆器、巡视器、星表智能机器人系统和各类科学设备等多类型用户通导遥业务需求能力缺口出发，针对星座网络节点及用户节点大尺度空间分布、节点轨道异构、复杂时延以及跨域互联等特点，融合地月协同下分布式核心网及国际化多中心协作的理念，突破传统卫星互联网集中式控制模式和地面依赖型管理机制，提出“地月协同-地面联合”的一体化运行控制与运营管理体系架构，方案如图2所示。本方案提出“鹊桥”星座的运行控制与运营管理体系应由星座运营管理中心、在轨分布式核心网、天地联合测控通信网、星地联合工程支持系统组成。

表2 “鹊桥”星座运行控制与运营管理体系能力需求与现有能力对比表

Table 2 Queqiao constellation operation and management system: capability requirements versus current capabilities

功能	能力指标需求	现有能力
长期近实时测控	<ul style="list-style-type: none"> <li>并行测控≥100颗探测器</li> <li>全天时测控覆盖</li> <li>多工程任务、多目标并行管控</li> <li>星座级关联健康和在轨自主故障处置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地月测控站~10套</li> <li>测控覆盖时长22/24</li> <li>序列式并行管控,并行自动化程度有限</li> <li>无星座级健康管理能力</li> </ul>
高速网络化通信	<ul style="list-style-type: none"> <li>入网用户≥100个</li> <li>星地/星间骨干通信速率&gt;500 Mbit/s</li> <li>互联互通互操作:支持CCSDS、DTN、TCP/IP、LTP多协议兼容,支持与主要国际月球网络互联</li> <li>网络化管理与通信资源动态分配</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不支持网络化按需接入服务</li> <li>星地数传通信速率~10 Mbit/s,链路资源紧张</li> <li>支持部分标准,目前尚未建立体系化、端到端的国际化服务能力</li> <li>点对点链路管理</li> </ul>
高精度导航定轨授时	<ul style="list-style-type: none"> <li>星座定轨精度~米级,地月联合深空探测器测定轨~百米级</li> <li>导航精度:重点区域10 m量级,全月100 m,地月空间~50 m量级</li> <li>星间时间同步精度~10 ns级</li> <li>月面导航增强服务能力~米级</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>VLBI测量与测距测速,精度10~100 m级,深空探测器定轨精度~几十千米级,地月尺度VLBI测量精度(试验)~100 m级<sup>[27]</sup></li> <li>不具备为月面用户提供导航能力</li> <li>星地钟差修正精度~百ns级</li> </ul>
遥感与在轨信息服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>大规模多载荷任务联合规划能力</li> <li>星上智能预处理与信息提取</li> <li>一体化数据服务与共享</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>并行载荷任务规划量≤10种</li> <li>地面数据处理</li> <li>数据分任务、分系统管理,形成数据孤岛</li> </ul>

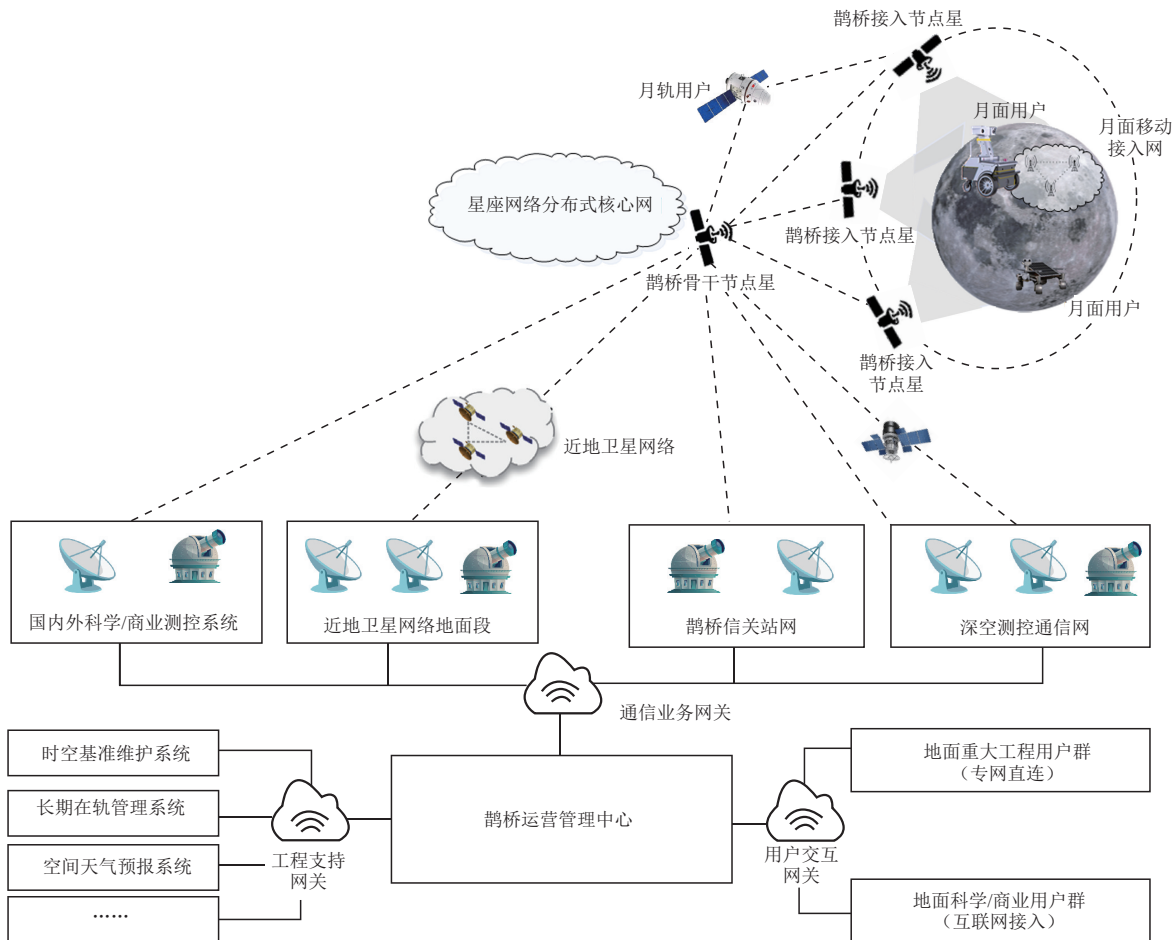


图2 “鹊桥”星座一体化运行控制与运营管理体系方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of integrated operation and management system scheme for Queqiao constellation

1) 星座运营管理中心

作为星座地基管控核心, 承担星座全任务周期的集中管控、资源调度、用户服务与决策支持职能。需针对未来“鹊桥”星座运行控制与运营管理需求, 新建多星多任务并行运控系统、通导遥资源智能调度引擎、数字孪生仿真推演平台、国际化用户服务门户及网络安全防护体系。

2) 在轨分布式核心网

作为月球空间域中枢, 支持月面/月轨用户通过月基分布式核心网完成用户鉴权、动态路由规划与拓扑管理, 提升系统抗毁性和服务实时性。在星座建设过程中需在“鹊桥”骨干节点星部署跨域网络协议转换与互操作功能, 在接入节点星部署边缘核心网功能, 开展分域协同管控, 降低全局控制复杂度。

3) 天地联合测控通信网

作为天地信息交互动脉, 包括地面站/中继星组成的测控通信系统, 为星座和用户提供了测控、数传等基本测控业务和高速大容量通信服务, 是天地一体化运行的基础支撑。在现有测控通信网能力的基础上, 整合升级国内深空站、VLBI站至Ka频段, 引入国际和商业测控资源, 新增天基测控星与“鹊桥”专属的激光和微波站, 建立统一的资源调度管理系统, 建成

星地全时、高速测控通信保障。

4) 星地联合工程支持系统

作为星座综合能力保障基座, 包括地面现有时间基准维护系统、长期在轨管理系统、空间气象与态势感知系统等, 实现对星座各资产全生命周期管理、高精度时空基准生成和空间环境监测, 保障星座长期稳定、可靠、精确运行。建设工程支持网络, 打通与各工程单位连接, 联合开展地月高精度时空基准建立与传递、基于大数据与人工智能<sup>[28]</sup>的健康管理、地月空间环境与态势感知等能力建设。

通过各部分有机协同, 实现对星座的集中管控、分布处理、自主智能、天地联动的运行控制与运营管理先进体系, 保障“鹊桥”星座高效履行其通导遥使命, 并持续支撑载人登月、国际月球科研站等重大工程任务。

3.2 通导遥融合的地月协同功能架构设计

本文在借鉴现有3GPP NTN标准, 结合卫星互联网、6G天地一体化自治网络等分层架构经验, 面向地月空间通信时延敏感业务的跨域协同需求, 设计包括星座控制、网络管理、资源分配、业务响应和数据管理等5个维度的功能架构, 实现星座网络资源优化配置、任务协同调度、用户业务高效响应及全方位的网络运维保障, 功能架构如图3所示。

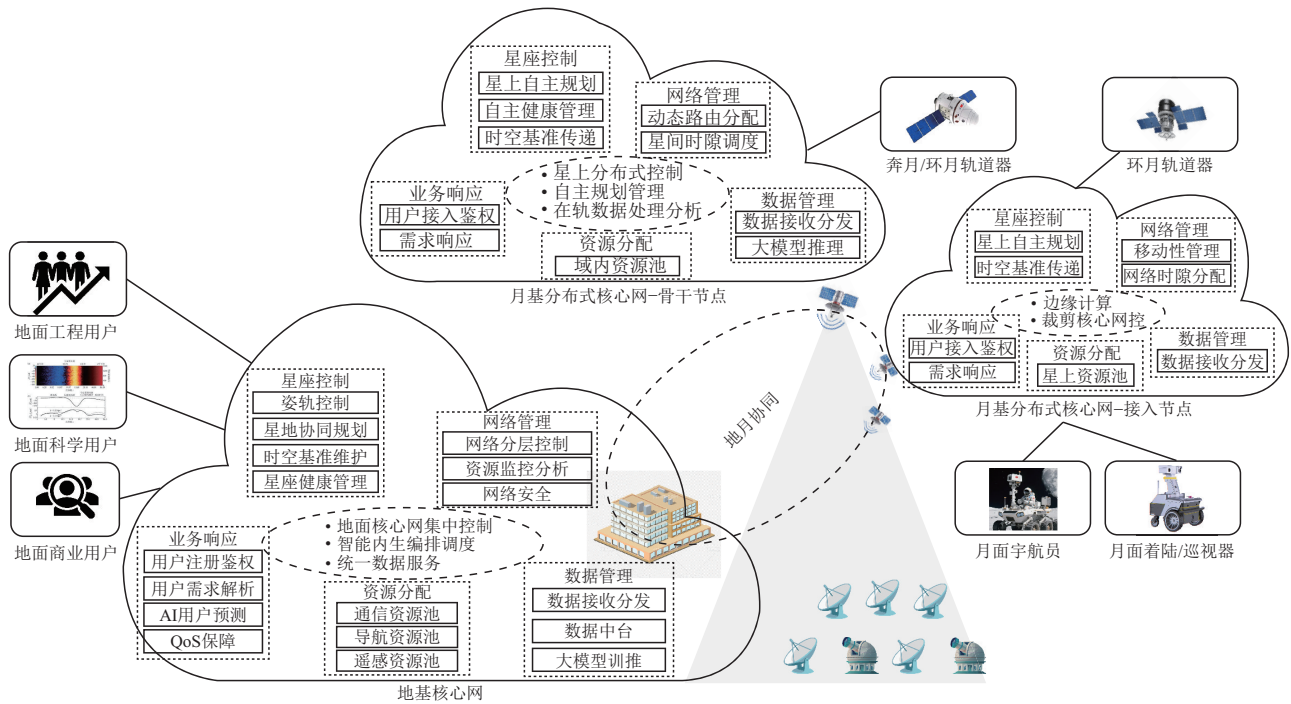


图3 地月协同分布式运行控制与运营管理功能架构图

Fig. 3 Earth-Moon collaborative distributed functional architecture framework for operation and management of Queqiao constellation

### 1) 星座控制

星座控制主要包括星座轨道与姿态管理、星地协同任务规划、设备优先级调度、时空基准维护与传递及星座健康管理等功能。具备星座级、单星级、载荷级等多级任务规划、天地协同的健康管理和星座效能评估能力,维护星座拓扑构型、地月高精度时空基准,为地月空间基础设施的长期稳定运行提供全生命周期的技术保障。

地基星座管控能力可通过攻克多粒度数字孪生技术<sup>[29]</sup>、分布式星座控制技术<sup>[30-31]</sup>、在轨关联健康预测技术<sup>[32-35]</sup>、高精度轨道动力学建模技术<sup>[36]</sup>、地月钟差修正技术等,利用地面运营管理中心、深空测控网、VLBI测量网、星座长期在轨管理系统及时空基准系统,分布式部署星座轨道仿真分析模块、任务规划引擎、健康管理平台及地月高精度时空基准维护模块,实现星座任务全局规划、资源优先级调度、健康监视评估和星地时空同步。

月基星座管控能力可通过引入边缘轻量化AI模型与联邦学习技术<sup>[30]</sup>、自主故障预测技术<sup>[35-39]</sup>等,骨干节点星作为分布式管控节点,部署高性能计算模块,支持自主动态调整星座构型与频谱资源、载荷自适应管理和星上自主故障检测与处置。

### 2) 网络管理

网络管理主要包括地月网络分层控制、网络节点监测分析及网络安全控制等功能,形成基于网络“监-管-控-析”的全链路管理能力。具备全维度、智能化的网络运维管理能力,对所有网络节点与链路实施实时监控与动态管控,建立分级权限接入控制和移动性管理体系,在极端环境与超长延迟约束条件下确保网络稳定运行,为各类地月活动提供支撑。

地基网络管理能力可通过在运营管理中心部署网络核心控制器、频谱管理服务器、地月协议转换网关等,利用软件定义网络(Software Defined Networking, SDN)技术<sup>[40]</sup>,完成网络全局拓扑管理、地月网关静态路由策略配置、频谱资源全局分配、跨网跨域协议转换等集中式策略上注;利用全局网络态势感知技术,实现跨域网络节点统一状态监视、用户接入质量管理、跨域网络链路故障恢复及网络安全主动防御等功能。

月基网络管理能力可通过在骨干节点星部署边缘控制器、本地监测代理、星间链路管理等模块实现,具备域内星间链路时隙调度、动态路由分配、自主网络状态监测与故障自愈等功能,具备离线自治能力,并利用轻量级SDN代理<sup>[41]</sup>实现与地基协同。接入节点星进一步裁剪核心网功能,提供用户接入服务和移动

管理能力。该方案可实现网络能力的有限分离与高度融合,适用于地月大时延、不稳定的信道环境。

### 3) 资源分配

资源分配主要包括通信、导航、遥感及在轨信息服务的统一监测、编排与分配功能。具备通导遥一体化资源分配能力,通过构建全域业务资源监测体系,实时感知资源的动态变化,完成通导遥业务资源的跨域融合与能力协同,为地月空间多样化任务需求提供弹性适配的能力支撑,完成通导遥业务的跨域融合与能力协同。

地基资源分配能力可通过在地面运营管理中心部署通导遥融合处理平台、服务质量(Quality of Service, QoS)策略服务器、多功能载荷协同控制器和资源池管理平台,基于资源池化技术<sup>[42]</sup>和多约束优化技术,将星座各卫星的通信链路、地面站、频谱、导航覆盖、导航增强、遥感成像谱段、星上算力资源同物理设施和平台解耦,进行统一协同调度和动态分配,支持星座全局视角的跨功能资源复用。

月基资源分配能力可通过在月基节点集成载荷自主规划、边缘融合处理单元,利用边缘算力实现动态资源调配和域内资源分配及星上载荷规划响应。

### 4) 业务响应

业务响应主要包括星地用户全生命周期管理、业务分层响应、QoS保障、资源与成果管理等功能。具备星座通导遥业务全流程的闭环管控能力,在传统UPF(User Plane Function)服务化<sup>[43]</sup>的基础上,通过建立科学的用户与业务分级管理机制,融合需求智能解析、边缘计算及网络资源预分配技术,构建用户驱动端到端服务管理体系,支持面向在轨用户、地面用户的空间大尺度分布及业务复杂时延响应下通导遥业务的需求。

地基业务管理能力可通过在地面运营管理中心部署用户管理服务器、业务需求解析平台、QoS策略引擎等,形成统一的业务服务平台,承担星座业务能力发布、用户接入与需求解析、全局资源统筹分配、长期业务策略制定维护、跨系统协同与对外业务、任务效益评估与优化等非实时性、复杂计算处理任务。系统可根据不同用户业务的QoS约束,如带宽、等待时间等,联合资源编排模块完成业务服务拆解和资源编排调度,实现对用户通信、导航、遥感及信息服务等核心服务的高效响应、深度融合与按需供给。

月基业务管理能力可通过在月基节点星部署月球用户接入网关、业务优先级调度器、实时QoS执行代理等模块,将时延敏感性业务如应急通信、导航搜救、常态化月球用户接入鉴权等业务前置到月基骨干

节点部署的分布式核心网。

5) 数据管理

数据管理主要包括统一数据资产化管理、多源数据融合分析等功能。具备覆盖全生命周期的数据治理能力,形成从原始数据采集处理、关键信息提取到业务态势推演的完整技术链条,同步实现业务和设备的长期趋势精准预测与量化分析,为系统决策提供全维度数据支撑,推动数据资源向业务价值的高效转化。

地基数据管理能力可通过混合云架构构建云化数据平台,通过地基运营管理中心部署核心云、地面站点部署边缘云的模式,联合公有云数据和部分开放算法模型共享功能,对星座工程数据、任务数据、用户数据及其它衍生数据实现采集、处理、分组分发、分析、数据质量控制与追溯、全流程的资产化运营管理与归档灾备等功能。

月基数据管理能力可通过在月基节点星部署大容量抗辐照数据存储阵列、边缘高性能算力芯片、轻量化AI模型、通导遥数据预处理单元及星上分布式云管理平台等模块,支撑星间数据高速采集、科学数据在月实时处理分析、高性能导航数据解算等功能的星上实现。

系统各功能通过地基全量、月基适度裁剪部署的模式,连接地基运营管理中心、月基骨干节点的分布式核心网及地月协同交互链路,形成分布式跨越控制、天地月协同的一体化运行控制与运营管理体系。

3.3 一体化技术架构设计

从系统功能架构出发,将“鹊桥”星座一体化运行控制与运营管理系统分为信息采集层、基础能力层、技术支撑层、功能应用层、用户服务层等5层,通过底层能力、数据、算法模型与微服务等资源的高度复用,实现运营管理和运行控制的一体化响应。具体技术架构如图4所示。

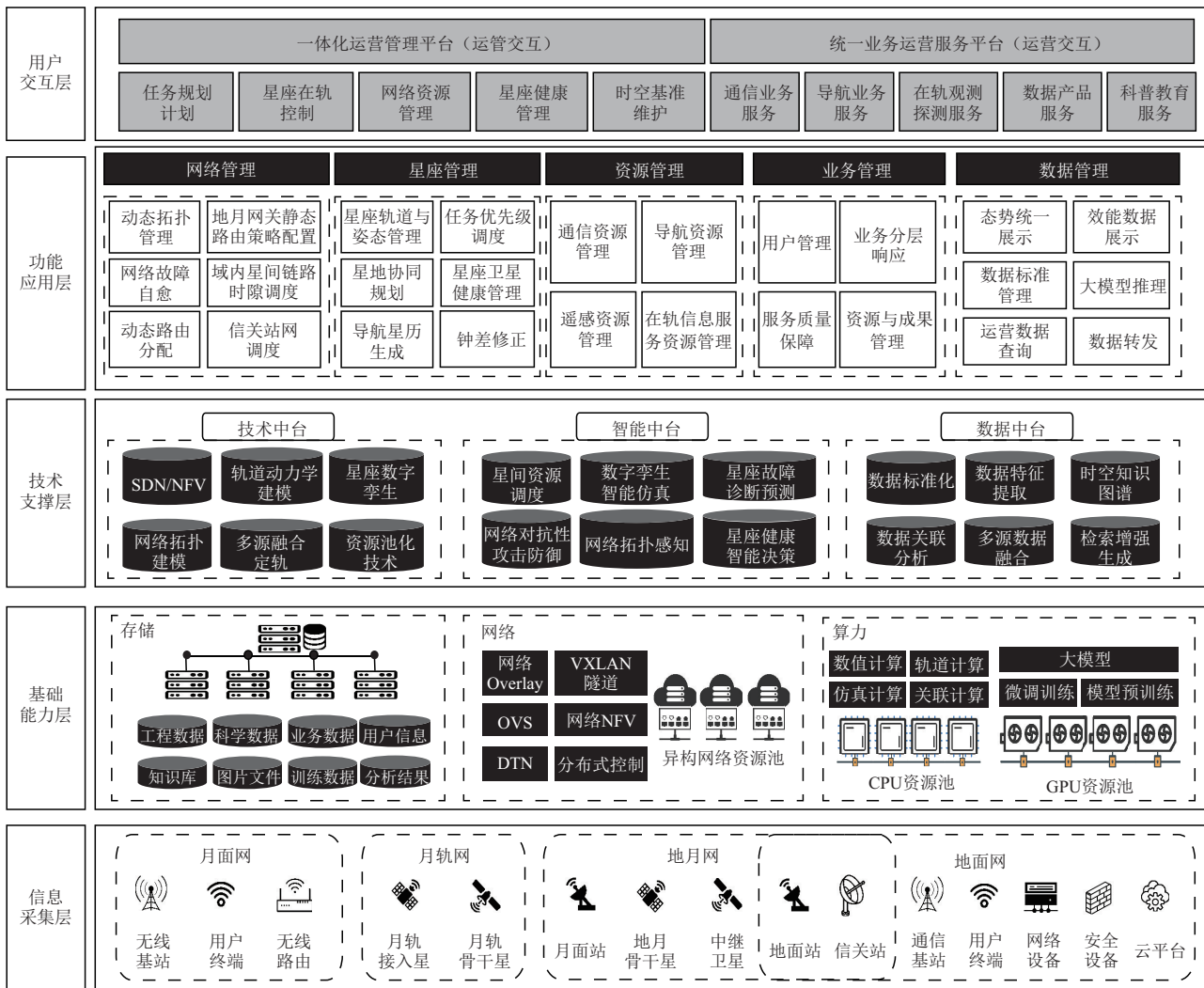


图4 “鹊桥”星座运行控制与运营管理技术架构框架

Fig. 4 Technical architecture framework for operation and management of Queqiao constellation

信息采集层主要基于“鹊桥”信关站和全球布局的地面站网,获取星座及用户航天器的工程数据、科学数据、业务数据、用户信息等。

基础能力层主要利用网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV)技术、Kubernetes、Docker容器化编排技术、存储池化技术、神经网络异构计算架构(Compute Architecture for Neural Networks, CANN)融合技术为上层业务提供存储、算力和网络等基础设施支撑能力,借助多协议融合技术实现异构数据贯通,构建全局统一的存储架构。

技术支撑层主要包括技术、智能、数据3大中台能力,是关键技术集成与智能化赋能的中间枢纽。其中技术中台为系统提供星座网络拓扑建模、多源融合定轨、资源池化等技术支撑能力;智能中台为星座提供PyTorch深度学习、Ray强化学习及卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)等机器学习算法与框架的支撑;数据中台统一数据湖技术对各类业务场景提供数据标准化、数据特征提取、关联分析、数据挖掘等技术框架能力。

功能应用层主要依托底层分布式计算、联机分析处理、分布式全文检索技术与数据能力,通过微服务架构实现面向业务场景的网络、星座、资源、业务和数据管理5大业务领域的具体服务实现,提升系统整体韧性与运营效率。

用户交互层作为架构的顶层入口,通过一体化运营管理平台整合任务规划、星座在轨控制、网络管理运维等核心功能,以可视化组件、低代码技术的可视化仪表盘、基于WebGL的3D动态模型展示技术及AI多模态大模型技术等交互形式,为用户提供直观操作界面;同时通过统一业务服务运营平台为用户提供通信、导航、在轨观测以及科普教育、数据共享等服务,满足多元化需求。

## 4 结 论

作为地月空间基础设施,“鹊桥”星座建设将成为支撑人类深空探索的信息动脉,为中国及国际合作深空探测任务实施提供核心通信、导航和遥感服务保障。本文设计了一套“地月协同-国际联合”的一体化运行控制与运营管理体系架构方案,针对地月大空间尺度特性,建立基于星座控制、网络管理、资源分配、业务响应和数据管理等不同维度跨域协同管控机制,支持地月系统资源优化配置与跨组织运营效率提升。基于数据、算法与微服务的复用,提出了星座运营管理与业务运营服务的统一资源复用架构,降低了

系统的运营复杂度与成本,推动星座运行控制与运营管理能力向智能化、模块化、国际化和标准化发展。

随着关键技术的突破、国际合作和商业化深空探测任务的开展,“鹊桥”星座有望成为开启太空经济新时代的战略支点。其运营管理体系可通过资源预留、网络切片和高精度导航增强等手段,为月面资源开采远程操控、月基太空旅游游览、月球科学数据开放服务等不同商业场景提供差异化QoS保障,为高价值商业用户提供可靠、低时延、高数据率的通信导航服务,从而实现从基础建设支出向可持续经济服务收入的转变,全面提升星座的运行价值与社会回馈。

## 参 考 文 献

- [1] 杨孟飞,邹志刚,汪卫华,等.月球资源开发利用的进展与展望[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(1):1-10.  
YANG M F, ZOU Z G, WANG W H, et al. Progress and prospect of lunar resources exploitation and utilization[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(1): 1-10.
- [2] 任筱强,吴伟仁,王洪雨,等.月球探测发展与关键技术展望[J].深空探测学报(中英文),2025,12(2):99-109.  
REN X Q, WU W R, WANG H Y, et al. Prospects of the lunar exploration development and key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(2): 99-109.
- [3] 杨孟飞,彭兢,李炯卉,等.地月空间基础设施体系架构与发展设想[J].中国空间科学技术(中英文),2024,44(3):1-14.  
YANG M F, PENG J, LI J H, et al. Architecture and development envision of cislunar space infrastructure[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3): 1-14.
- [4] NASA. LunaNet interoperability specification-version 5[EB/OL]. (2025-1-29) [2025-6-30]. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/lunanet-interoperability-specification/>.
- [5] ISRAEL D J, MAULDIN K D, ROBERTS C J, et al. LunaNet: a flexible and extensible lunar exploration communications and navigation infrastructure[C]//Proceedings of 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2020.
- [6] PIETRO G, RICHARD S, CHERYL G, et al. LunaNet position, navigation, and timing services and signals, enabling the future of lunar exploration[C]//Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+2023). Denver, Colorado: ION, 2023.
- [7] NASA. Lunar exploration ground sites[EB/OL]. (2025-01-29) [2025-06-30]. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/lunanet-interoperability-specification/>.
- [8] PIETRO G, FLOOR M, RICHARD S, et al. The lunar pathfinder PNT experiment and moonlight navigation service: the future of lunar position, navigation and timing[C]//Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Long Beach, California: ION, 2022.
- [9] SURREY SATELLITE TECHNOLOGY Ltd SSTL. Lunar pathfinder service guide[EB/OL]. (2022-08-03) [2025-06-30]. <https://www.sstl.co.uk/getmedia/ca388951-1330-4746-b641-72b7cd65f05a/Lunar-Pathfinder-Services-Service-Guide-V2-3.pdf>.
- [10] MASAYA M, ISAO K, SATOSHI K. Lunar navigation satellite system and positioning accuracy evaluation[C]//Proceedings of the 2022

- International Technical Meeting of The Institute of Navigation. Long Beach, California: ION, 2022.
- [11] 周文艳,高博宇,董焯珊,等. “鹊桥”二号轨道与嫦娥六号任务匹配性设计和飞行实践[J]. 中国空间科学技术(中英文),2024,44(6):16-22.  
ZHOU W Y, GAO B Y, DONG T S, et al. Matching design of trajectory with Chang'e-6 mission and flight practice of Queqiao-2 satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(6): 16-22.
- [12] 甘晓. 中国构建地月空间三星座[N]. 中国科学报, 2025-04-17(01).  
GAN X. China builds three-satellite constellation in Earth-Moon space[N]. China Science Daily, 2025-04-17(01).
- [13] 王洁. 中国星网发射成功揭秘中国版“星链”[N]. 中国信息化周报, 2024-12-23(16).
- [14] 王佳奇,池嘉诚,贺绍飞,等. 巨型低轨星座发展现状及启示[J]. 中国航天, 2024(6):39-45.  
WANG J Q, CHI J C, HE S F, et al. Development status and implications of giant low earth orbit constellations[J]. Aerospace China, 2024, (6): 39-45.
- [15] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1):3-8.  
NING J S, YAO Y B, ZHANG X H. Review of the development of global satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(1): 3-8.
- [16] 蔡洪亮,孟铁男,耿长江,等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估:定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. 测绘学报, 2021, 50(4):427-435.  
CAI H L, MENG Y N, GENG C J, et al. BDS-3 performance assessment: PNT, SBAS, PPP, SMC and SAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 427-435.
- [17] 赵坚,孟令杰,王琦,等. 我国高分辨率对地观测系统建设与发展[J]. 卫星应用, 2022(11):8-13.  
ZHAO J, MENG L J, WANG Q, et al. The construction and development of China's high-resolution Earth observation system[J]. Satellite Application, 2022(11): 8-13.
- [18] 周述淇,陈发堂. 5G非地面网络技术进展研究[J]. 电子技术应用, 2025, 51(3):6-11.  
ZHOU S Q, CHEN F T. Research on the process of non-terrestrial networks for 5G[J]. Application of Electronic Technique, 2025, 51(3): 6-11.
- [19] 韩皓,李隽,曲岩. 3GPP NTN技术演进与探索[J]. 通信世界, 2024(20):38-41.  
HAN H, L J, QU Y. Evolution and exploration of 3GPP NTN technology[J]. Communications World, 2024(20): 38-41.
- [20] 贾明学,张晨晨,肖培纪. 5G通信中的NTN关键技术研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(6):51-55.  
JIA M X, ZHANG C C, XIAO P J. Research on the key technologies of the NTN in 5G communications[J]. Science & Technology Information, 2024, 22(6): 51-55.
- [21] 陈孟尝,李文彬,许建新,等. 基于3GPP的NTN解决方案和关键技术研究[J]. 邮电设计技术, 2024, (12):41-47.  
CHEN M C, LI W B, XU J X, et al. Research on 3GPP based NTN solution and key technologies[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2024, (12): 41-47.
- [22] 缪德山,柴丽,孙建成,等. 5G NTN关键技术与演进展望[J]. 电信科学, 2022, 38(3):10-21.  
MIAO D S, CHAI L, SUN J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 10-21.
- [23] 孙晨华,何辞,张亚生,等. 地月空间信息网络体系架构对比研究[J]. 载人航天, 2018, 24(5):624-629.  
SUN C H, HE C, ZHANG Y S, et al. Comparison study on architectures of Earth-Moon space information network[J]. Manned Spaceflight, 2018, 24(5): 624-629.
- [24] 乔梁,李承昊,王善澎,等. 地月云网:跨越融合一体的地月空间网络[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2024, 44(3):43-50.  
QIAO L, LI C H, WANG S P, et al. Cislunar cloud network: the cross-domain integrated cislunar-spatial network[J]. Chinese Space Science and Technology, 2024, 44(3): 43-50.
- [25] 何熊文,陈朝基,贾雨琴,等. 载人月球探测一体化网络和协议架构设计与验证[J]. 宇航学报, 2023, 44(9):1411-1422.  
HE X W, CHEN C J, JIA Y C, et al. Design and verification of integrated network and protocol architecture for China's manned lunar exploration[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(9): 1411-1422.
- [26] 丛佃伟,吴富梅,李崇辉,等. 地月空间航天器自主导航技术及研究进展[J]. 无线电工程, 2025, 55(2):317-322.  
CONG D W, WU F M, LI C H, et al. Autonomous navigation technology and research advances of cislunar space spacecraft[J]. Radio Engineering, 2025, 55(2): 317-322.
- [27] 黄逸丹,黄勇,樊敏,等. 基于地基测量数据的月球DRO轨道定轨精度分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(4):405-413.  
HUANG Y D, HUANG Y, FAN M, et al. Analysis of cislunar dro orbit determination accuracy using Earth-based simulated observations[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(4): 405-413.
- [28] 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(中英文), 2019, 6(4):303-316, 383.  
YE P J, MENG L Z, MA J N, 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.
- [29] 陈何雄,吴佳平,韦云凯,等. 面向软件定义网络的可变粒度数字孪生构建技术[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(10):3101-3107.  
CHENG H X, WU J P, WEI Y K, et al. Variable granularity digital twin construction technology for software defined network[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(10): 3101-3107.
- [30] 芦效峰,廖钰盈,PIETRO L,等. 一种面向边缘计算的高效异步联邦学习机制[J]. 计算机研究与发展, 2020, 57(12):2571-2582.  
LU X F, LIAO Y Y, PIETRO L, et al. An asynchronous federated learning mechanism for edge network computing[J]. Journal of Computer Research and Development, 2020, 57(12): 2571-2582.
- [31] 赵双朋,宋华,李克行,等. 星座导航与控制分布式仿真系统设计[J]. 航天控制, 2010, 28(6):56-62.  
ZHAO S P, SONG H, LI K X, et al. Design of distributed simulation system for navigation and control of satellite constellation[J]. Aerospace Control, 2010, 28(6): 56-62.
- [32] 李瑞雪,张泽旭. 国际空间站健康管理系统对中国空间站建设的启示[J]. 载人航天, 2020, 26(1):120-127.  
LI R X, ZHANG Z X. Enlightenment of ISS health management system on construction of China space station[J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(1): 120-127.
- [33] 杨天社,金光,樊恒海,等. 卫星在轨状态检测与健康管理工作[M]. 北京:国防工业出版社, 2019.  
YANG T S, JIN G, FAN H H, et al. Satellite on-orbit status detection and health management technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [34] 彭喜元,庞景月,彭宇,等. 航天器遥测数据异常检测综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9):1929-1945.  
PENG X Y, PANG J Y, PENG Y, et al. Review on anomaly detection of spacecraft telemetry data[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 1929-1945.
- [35] 艾绍洁,宋佳,王鹏程. 载人航天器自主故障诊断与预测技术研究进展综述[J]. 无人系统技术, 2023, 6(1):26-42.  
AI S J, SONG J, WANG P C. Review of the development of autonomous fault diagnosis and prediction technology for manned spacecraft[J]. Unmanned Systems Technology, 2023, 6(1): 26-42.

- [36] 刘付成,朱东方,黄静.空间飞行器动力学与控制研究综述[J].上海航天(中英文),2017,34(2):1-29.  
LIU F C, ZHU D F, HUANG J. Review of dynamics and control study of spacecraft[J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(2): 1-29.
- [37] 梁克,邓凯文,丁锐,等.载人航天器在轨自主健康管理系统体系结构及关键技术探讨[J].载人航天,2014,20(2):116-121.  
LIANG K, DENG K W, DING R, et al. Autonomous on-orbit health management architecture and key technologies[J]. Manned Spaceflight, 2014, 20(2): 116-121.
- [38] 王大轶,孟林智,叶培建,等.深空探测器的自主运行技术研究[J].航天器工程,2018,27(6):1-10.  
WANG D Y, MENG L Z, YE P J, et al. Research of autonomous operation technology for deep space probe[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(6): 1-10.
- [39] 何熊文,郭坚,李玉庆,等.深空探测器自主健康管理需求及其软件架构[J].控制理论与应用,2019,36(12):2065-2073.  
HE X W, GUO J, LI Y Q, et al. Autonomous health management requirements and software architecture for deep space probe[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(12): 2065-2073.
- [40] 曹怡璐,贾子晔,尤嘉豪,等.基于SDN和NFV的空天地一体化网络任务部署与恢复综述[J].电信科学,2025,41(5):1-16.  
CAO Y L, JIA Z Y, YOU J H, et al. A survey of task deployment and recovery in space-air-ground integrated networks based on SDN and NFV[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(5): 1-16.
- [41] 王首一,李琦,张云.轻量级的软件定义网络数据包转发验证[J].计算机学报,2019,42(1):176-189.  
WANG S Y, LI Q, ZHANG Y. LPV: Lightweight packet forwarding verification in SDN[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(1): 176-189.
- [42] 裴敬辉,刘爱军,董超颖,等.卫星通信中心站在资源池化架构下的系统可靠性分析[J].通信技术,2020,53(2):375-381.  
CHANG J H, LIU A J, DONG C Y, et al. System reliability analysis of satellite communication center station under resource pooling architecture[J]. Communications Technology, 2020, 53(2): 375-381.
- [43] 聂衡,赵慧玲,毛聪杰.5G核心网的部署问题与建议[J].中兴通讯技术,2020,26(3):3-8.  
NIE H, ZHAO H L, MAO C J. Deployment issues and suggestions of 5G core network[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(3): 3-8.

作者简介:

刘莹(1988-),女,工程师,主要研究方向:航天测运控、深空探测任务运营运营等。

通信地址:安徽省合肥市高新技术开发区中安创谷科技园二期深空探测实验室F1栋815室(230026)

电话:13776287655

E-mail:yinghe@mail.ustc.edu.cn

向开恒(1971-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:航天器总体设计、轨道仿真与控制。本文通信作者。

通信地址:安徽省合肥市高新技术开发区中安创谷科技园二期深空探测实验室F1栋806室(230026)

电话:13671271142

E-mail:xiangk@189.cn

## Operation and Management Technology of Queqiao Communication, Navigation and Remote Sensing Constellation System

LIU Ying<sup>1,3</sup>, LIU Peng<sup>2</sup>, ZHAO Jing<sup>1,3</sup>, LIU ZhongLiang<sup>1,3</sup>, HAN Hongbo<sup>2</sup>, WU Yiwei<sup>1,3</sup>,  
LI Xinyang<sup>2</sup>, LIANG Zongchuang<sup>1,3</sup>, LI Hongfei<sup>2</sup>, XIANG Kaiheng<sup>1,3</sup>

(1. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230026, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 10094, China;  
3. National Key Laboratory of Deep Space Exploration, Hefei 230026, China)

**Abstract:** To address challenges such as ultra-large-scale spatial distribution, deep integration of heterogeneous services and quality-of-service management, an operational control and management architecture based on “Earth-Moon Collaborative-International Joint” was proposed. Core issues including significant ground-space control delay, multi-service resource competition and interoperability among international heterogeneous systems were tackled through an integrated functional framework incorporating constellation operation, network management, resource allocation, service provisioning and data governance, enabling full-lifecycle mission management through ground-based control, Earth-Moon coordination, and lunar-based response. On this basis, a five-layer technical architecture centered on “Acquisition-Capability-Support-Application-Service” was designed to facilitate flexible reuse and efficient integration of functional modules. This study offers architectural support for China’s future lunar and deep-space missions, provides a theoretical and engineering basis for efficient management of complex Earth-Moon constellation systems, and can help promote the development of intelligent, open and commercialized Earth-Moon space information infrastructure.

**Keywords:** Queqiao net; Earth-Moon collaborative-international joint; operation and management; network control

### Highlights:

- A conceptual architecture for the Queqiao constellation operation and management system was proposed to meet the needs of manned lunar missions, the International Lunar Research Station, and deep-space exploration.
- The architecture adopts an “Earth-Moon Collaborative-International Joint” framework enables optimized resource allocation across the Earth-Moon system and improves operational efficiency among organizations.
- A layered and fault-tolerant design was applied to construct a multi-dimensional collaborative control model covering network management, constellation control, resource orchestration, service management, and data governance.

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:宋利辉]