

国际空间站舱外多载荷运行任务规划

单亚东^{1,2} 张汉勋^{1,2} 杜昌帅¹ 钟红恩¹

1(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 空间站舱外载荷平台支持部署众多不同类型的载荷, 为开展大规模空间科学研究提供了机会. 但随着舱外载荷数量及相应任务量的不断增加, 且在受限于资源约束的情况下, 需要制定科学合理的任务规划, 以提高舱外载荷的工作效率. 针对舱外多载荷运行任务规划方法, 深入分析了国际空间站舱外载荷任务规划现状, 重点分析了其舱外载荷平台、载荷类型及特点和多载荷运行任务规划方法, 分析当前任务规划策略、方法及未来发展方向. 根据中国空间站舱外载荷平台特点, 从载荷总体设计和运行任务规划方法等方面为中国空间站后续舱外多载荷系统运行任务规划提供参考和建议.

关键词 国际空间站, 舱外载荷平台, 舱外载荷, 运行任务规划, 中国空间站

中图分类号 V476.1

International Space Station External Multi-payload Operational Mission Planning

SHAN Yadong^{1,2} ZHANG Hanxun^{1,2} DU Changshuai¹ ZHONG Hongen¹

1(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The external payload platform of the space station supports the deployment of many different types of payloads, which provides opportunities for massive space scientific research. However, with the continuous increasing number of external payloads and corresponding number of missions, and limited by resource constraints, it is necessary to develop scientific and reasonable mission planning to improve the operational efficiency of external payloads and the output of the science benefit. In this paper, the status of mission planning for external payloads on the International Space Station (ISS) is comprehensively analyzed, focusing on the external payload platform, payload types and characteristics, and methods for multi-payload operation mission planning. The current mission planning strategies, methods, and future development directions are analyzed. Based on the characteristics of the external payload platform of the China's Space Station (CSS), this paper provides reference and suggestions for the subsequent mission planning of multi-payload system operation on the China's Space Station from the aspects of overall payload design and mission planning methods.

2023-04-21 收到原稿, 2023-07-19 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Key words International Space Station (ISS), External payload platform, External payload, Operational mission planning, China's Space Station (CSS)

0 引言

空间技术的快速发展推动空间科学与应用研究取得重大进展,空间站舱外载荷平台作为一种支持舱外载荷开展长期科学研究的重要空间应用资源,为利用空间站独特的微重力、高真空、强辐射和极端环境等条件开展多学科空间科学与应用研究提供了机会^[1].舱外载荷是安装于空间站舱外用于开展科学研究的实验设施,包括在舱外开展空间探测和观测类研究、空间应用新技术试验的独立载荷和直接暴露于空间环境中开展生物学、材料学和新技术实验的暴露载荷^[2].任务规划是载荷高效工作和完成科学目标的基础,规划结果决定了载荷工作时间和顺序,直接影响科学目标实现,合理的规划可避免资源利用冲突,实现资源利用和科学收益最大化^[3].

随着开展科学任务的载荷数量和种类逐渐增多,任务规划要素更多、约束条件更复杂、规划目标冲突,规划由单一载荷、单目标、预先规划向多载荷系统、多目标、动态规划转变,要求在有限时间和资源下得到可行且优化的结果,具有更大难度,需要更高效的规划方法.

国际空间站(International Space Station, ISS)已运行多年,相关机构在舱外载荷任务规划方法和工具等方面开展了研究,有力保障了载荷运行和科学收益,可为近地空间站舱外载荷任务规划提供参考.本文以ISS为研究对象,分析其舱外载荷平台特点、空间布局和应用资源,布置载荷类型和支持开展的多学科研究,以及任务规划方法和系统工具,为中国空间站舱外多载荷系统运行任务规划提供参考与启示.

1 ISS 舱外载荷平台

舱外载荷平台是位于空间站舱外为载荷提供安装空间和应用资源支持的空间设施,兼具应用卫星、科学卫星和新技术卫星等航天器平台特性,基于平台布置载荷具有支持多学科研究、成本较低、提供更适宜条件支持等特点.ISS拥有多类型舱外载荷平台,在平台布局和应用资源支持等方面具有显著特点.

基于空间站平台布置舱外载荷,可提供开展多学科研究的实验环境^[4,5].宽视场、变交点的运行轨道为地球科学研究提供高空间分辨率和可变光照条件;高真空、电离层环境为空间天文和环境研究提供条件;强辐射、极端温度为生物、材料和元器件暴露研究提供条件.空间站平台通过适配器与载荷连接,提供相当于卫星平台的供电、热控、信息管理等基础设施支持;提供连续工作环境,支持系列化和长期科学实验;载荷任务完成后可根据需要将样品和设备返回地面进行实验室分析和评价.

在平台布局方面,ISS舱外载荷平台依据舱段可分为俄罗斯舱段和美国舱段平台两部分.其中,俄罗斯舱段星辰号舱外右舷布置4个载荷平台;探索号和码头号舱外布置载荷工位和扶手连接装置;科学号舱外布置12个多功能工位(Multipurpose Workstation, MW),最多容纳16个载荷,如图1所示^[6].

由图1可知,俄罗斯舱段舱外载荷平台以舱外裸露表面布置为主,多位于迎风和背风方向,分布较为分散.

美国舱段载荷平台由美国、日本和欧空局三方部署(见图2)^[7],分别是美国舱外载荷平台(ExPRESS Logistics Carrier, ELC)、日本舱外载荷平台(Japanese Experiment Module-External Facility, JEM-EF)、欧空局舱外载荷平台(Columbus External Payload Facility, CEPF).

ELC位于桁架左右两侧,分别为ELC1~4,每个ELC可提供2个工位(轨道替换单元ORU除外);此外还有用于安装大型实验设备阿尔法磁谱仪(AMS-02)的外部挂点.JEM-EF位于希望号舱外左舷,最多可同时提供10个安装工位.CEPF位于哥伦布号舱外右舷,可容纳朝天(SOZ)、对地(SDN)和右舷端向(SOX和SDX)4个工位,并在舱外前端拥有一个提供12个载荷工位的商用平台^[8].

综上所述,在平台布局方面,ISS舱外载荷平台可提供迎风、背风、朝天、对地不同的指向资源,JEM-EF的布局方式使得载荷间遮挡较少,便于各方向的载荷工作;ELC载荷平台分布较为分散;CEPF

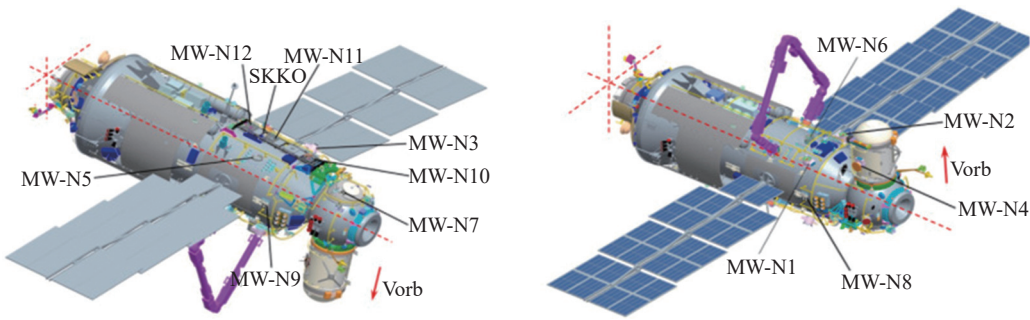


图 1 科学号多功能工位左舷与右舷位 (MW-N1~12 为多功能工位)

Fig. 1 Port and starboard position of Nauka multipurpose workstation (MW-N1~12 stands for multipurpose workstations)

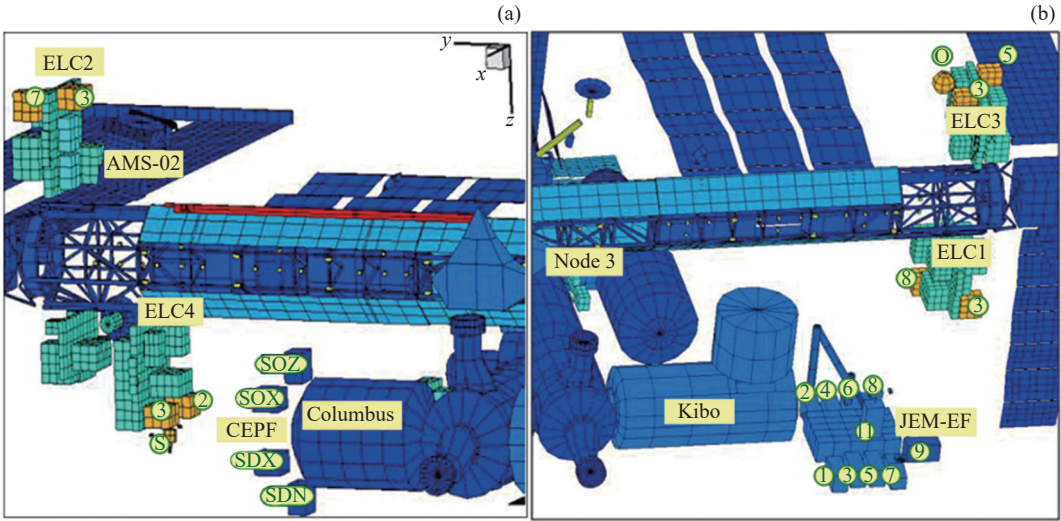


图 2 ISS 美国舱段舱外载荷平台分布 (数字为各舱外平台载荷适配器编号)

Fig. 2 Distribution of ISS USOS external payload platform (The numbers represent the identifiers for payload adapters on each compartment's external platform)

的布局会使得载荷间存在视场遮挡, 不利于载荷同时工作. 且有三种安装方式, 分别是以 ELC 为代表的桁架、以 JEM-EF 为代表的加压舱外部专用裸露舱段、以 MW 为代表的加压舱外表面. 每个载荷工位可容纳一至多个相同或不同类型研究领域的载荷设备.

在平台提供应用资源方面, 俄罗斯舱段研究资料较少, 美国舱段平台可提供安装空间、电能、热控、数据传输等资源支持, 具体信息列于表 1^[9].

由表 1 可知, 美国舱段三平台在载荷容积方面基本相同; JEM-EF 可提供较大承重、电能、通信容量和工位数, 在热控制方面提供 3~6 kW 的先进主动流体回路散热; 在工位使用方面 JEM-EF 和 CEPF 平台的一半由美国方面共享. 可以看出日本在舱外载

荷平台研究方面处于先进地位, 日本和欧空局在平台使用方面受到美国方面约束.

2 ISS 舱外载荷

ISS 舱外载荷呈现多学科类型、多样化需求特点, 支持开展空间天文与环境、空间地球科学、空间应用新技术和空间科学实验 (材料暴露、辐射生物、元器件暴露) 等四大类研究, 以载荷工作需求即科学任务为导向, 载荷在安装位置、资源支持等方面存在多样需求, 导致任务规划更为复杂. ISS 国际参与方利用舱外平台布设了多类型载荷, 例如俄罗斯舱段开展了 MiniEUSO 多用途紫外对地观测和宇宙射线探测实验^[10]、加拿大地球观测实验^[11]、日本固体润滑镀层实

表 1 ISS 美国舱段舱外载荷平台信息
Table 1 Information of ISS USOS external payload platform

类型	ELC	JEM-EF	CEPF
入轨时间(年)	2009—2011	2008	2008
容积/m ³	1.2	1.5	1.2
承重质量/kg	227	550/2 250	230
电能/kW	0.75	3/6	2.5
热控方式	被动热控	主动热控	被动热控
通信容量/(Mbit·s ⁻¹)	1~6	100	1/2
美国共享数/总工位数	8/8	5/10	2/4
平台位置	桁架P3/ S3上下	希望号舱左舷	哥伦布号舱右舷

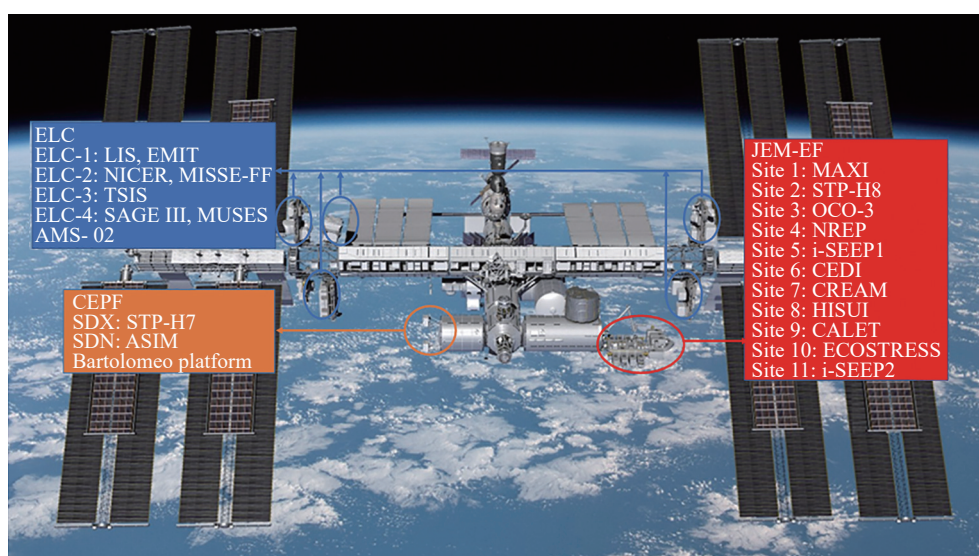


图 3 美国舱段现有舱外载荷分布

Fig. 3 Distribution of existing external payloads of the USOS

验和碳化硅陶瓷材料暴露实验、欧空局多用户暴露实验和生物实验^[12]等,涉及空间天文与环境、空间地球科学、空间科学实验等学科。

美国舱段布设了大量舱外载荷,截至2023年6月,现有载荷安装位置如图3所示,表2依学科和时间列出了不同学科现有载荷及其任务概况和先前部署的载荷。

图3中蓝色、红色和橙色部分分别为ELC平台、JEM-EF平台和CEPF平台现有载荷。从图3可以看出,JEM-EF平台支持的研究较多,平台利用率高,且具有ExHAM扶手连接装置用于开展暴露实验;ELC平台利用也较高,支持大型载荷工作;CEPF平台利用率中等,Bartolomeo平台的安装进一步拓

展了CEPF平台的载荷容纳量。

由图3和表2可知,ISS舱外载荷在空间天文与环境领域重点研究内容为利用X/γ高能射线探测手段获取目标信息,例如暗物质、中子星或进行巡天扫描观测,载荷一般位于朝天或迎风方向,近年来未安排新的载荷任务。空间地球科学领域为舱外载荷开展最多的领域,占现有载荷任务的一半左右,重点研究内容为利用光学和无线电设备开展海洋与陆地遥感观测、气候变化监测,且近年来对生态系统和气候变化的关注度越来越高,载荷一般位于具有地球指向或地球边缘视场位置。空间应用新技术领域开展了激光通信、导航、在轨服务技术等,当前以美国国防部的STP-H系列技术试验任务为主,重点开展先进传感

表 2 美国舱段舱外载荷信息
Table 2 Information of USOS external payloads

涉及学科	载荷名称	安装时间	任务概况	先前载荷
空间天文 与环境	全天区X射线探测器MAXI ^[13]	2009年	宽能量带X射线全天区扫描观测	SEDA: 运行轨道空间环境测量 ^[19] SOLAR: 太阳辐照度测量 ^[20]
	阿尔法磁谱仪AMS-02 ^[14]	2011年	反物质与暗物质宇宙射线高精度测量	
	CAIorimetric电子望远镜CALET ^[15]	2015年	高能宇宙射线测量	
	宇宙线和暗物质探测器CREAM ^[16]	2017年	宽能量带宇宙射线测量	
	中子星内部成分探测器NICER ^[17]	2017年	中子星结构、能量研究	
	太阳总辐照度测量仪TSIS ^[18]	2017年	太阳辐照地球能量测量	
空间地球 科学	商业平台NREP	2016年	地球观测	SMILES: 偏北极区平流层臭氧分布 ^[32] HICO: 沿海区域观测 ^[33] CATS: 云和气溶胶雷达测量 ^[34] RapidScat: 海洋风雷达测量 ^[35] HDEV: 高清地球观测 ^[36] GEROS: 地表/海洋雷达测量 ^[37]
	小型可更换暴露实验平台i-SEEP1 ^[21] ^[22]	2016年	MOLI多观测激光雷达成像仪、iSIM地球观测等实验	
	闪电成像仪LIS ^[23]	2017年	闪电昼夜监测, 研究气候与空气质量	
	平流层气溶胶和气体实验SAGE III ^[24]	2017年	平流层气溶胶和臭氧分布测量	
	地球观测多用户系统平台MUSES ^[25]	2017年	DESI遥感成像仪等对地观测	
	大气-空间相互作用监测仪ASIM ^[26]	2018年	强雷暴及其在地球和气候中的作用研究	
	生态系统热辐射计ECOSTRESS ^[27]	2018年	生态系统温度监测, 研究植物对气候变化的影响	
	全球生态系统动态监测仪GEDI ^[28]	2018年	森林高度和结构测量, 研究碳循环对生态系统的影响	
	轨道碳观测仪OCO-3 ^[29]	2019年	地球CO ₂ 分布观测	
	高光谱成像仪HISUI ^[30]	2019年	地球资源高光谱遥感观测	
	Bartolomeo平台	2020年	外部载荷商用平台	
	地表矿物尘源监测仪EMIT ^[31]	2022年	地球系统矿物尘埃测量	
空间应用 新技术	空间测试计划STP-H7 ^[38]	2022年	CASPR先进计算和传感实验系统、Falcon Neuro神经形态相机技术、GAGG-1新型射线测量技术、LASSO局部空间观测技术、OSVW海洋风监测、PIANO成像与夜间观测技术	SIMPLE: 空间充气膜长期实验 ^[40] ICS-EF: 轨道间通信试验 J-SSOD: 立方星发射技术 ^[41] SDS: 空间碎片传感技术 ^[42] RRM3: 自主交会捕获及在轨服务技术试验 ^[43] OPALS: 激光通信试验 ^[44] ScaN: 空间通信与导航试验 ^[45] STP-H 系列先进技术试验
	空间测试计划STP-H8 ^[39]	2022年	COWVR海洋风测量、GAGG-2新型射线测量技术、TEMPEST大气湿度测量	
空间科学 实验	商业平台NREP	2016年	先进电子器件与材料暴露实验	MISSE-X系列材料暴露试验 ^[5] EXPOSE-E/R/R2辐射生物实验 ^[46-48] ExHAM系列实验(织物传感器、天线金属网、聚合物辐射屏蔽实验、生物暴露实验) ^[49]
	国际空间站材料实验MISSE-FF	2018年	材料和设备暴露研究	
	小型可更换暴露实验平台i-SEEP2	2022年	多类型实验	

成像、先进精密测量技术试验. 空间科学实验领域开展了材料和设备组件系列暴露实验、辐射生物实验研究, 载荷发展趋势是具有对照实验功能、环境控制与实时图像监测的通用性装置, 以更好研究空间环境对

研究对象的作用.

从载荷工作角度, 舱外载荷运行任务呈现工作条件各异、工作模式不同、任务时长不同等特点, 具有资源锁定和时间窗口特性, 需要平台提供电能、散

热、数传等资源进行特定目标观测和实验对象研究. 空间天文与环境载荷工作条件一般为避开太阳和南大西洋异常区 (South Atlantic Anomaly, SAA), 对观测目标可见, 运行工作期间具有时间窗口特性, 达到工作窗口时进行观测模式, 其余时间为待机模式, 任务周期较长. 空间地球科学载荷工作条件一般为目标可见 (光学载荷要求目标处于光照条件), 具有典型的时间窗口特性, 且任务周期内窗口较多, 具有待机、定标和观测工作模式. 空间应用新技术载荷工作条件一般为目标可见, 具有短期工作特性, 试验结束后即完成任务. 空间科学实验载荷在轨期间满足资源条件即可工作, 具有长期工作特性, 任务周期一般为一年及以上, 特别地对于辐射生物实验具有不可中断性, 因此具有资源锁定特性.

从任务规划角度, 由于运行时间的长期性、实验结果的不可预知性和资源限制, 同时多个载荷间存在需求冲突, 规划具有灵活性、约束性和收益最大化多目标特性, 使得规划更具复杂性和难度. ISS 规划人员对载荷的任务规划保障了载荷工作和科学目标实现. 据统计, ISS 已完成包含利用外部平台开展研究的近 4000 项科学实验和应用项目, 在宇宙和天体、气候变化与灾害监测、先进空间通信等方面获得大量丰富研究成果^[50].

3 ISS 舱外多载荷运行任务规划

舱外载荷运行任务规划主要指基于环境条件和资源约束, 为载荷制订出满足工作需求并使综合效益最优的任务计划^[51]. 任务规划由约束定义、需求定义、规划和日程生成四项基本过程组成, 其中约束定义是定义资源可用性和基本规则等其他约束; 需求定义是定义所需资源和工作环境等规划需求; 规划是采用一定方法在定义约束内分配与时间相关并满足需求的资源; 日程生成即为可行且最大化实现的任务日程表. ISS 于上世纪 90 年代起研究形成了空间站舱外载荷任务规划方法和分布式载荷任务规划系统工具.

3.1 ISS 舱外多载荷运行任务规划方法

ISS 任务规划包括系统综合运行和载荷利用任务规划. 相对舱内科学实验柜和独立实验载荷主要利用空间站的微重力环境, 在满足资源约束的条件下即可工作, 舱外载荷的工作条件更为复杂, 是运行轨道、

空间环境、观测目标综合作用的结果, 具有鲜明的时间窗口特性. 但舱内外载荷任务规划在规划模型和求解方法上存在相同或相似性, 因此 ISS 在统筹全面考虑工作条件和约束的基础上, 将舱外载荷任务规划同舱内载荷与系统综合运行规划一同考虑.

ISS 舱外载荷任务规划采用时间分阶段、资源分层级、空间分布式的方法, 由分布在各地的参与方和规划人员对资源进行需求和分配的上下行交互, 实现长期和短期任务规划. 其中涉及增量和规划周期两个名词, 增量 (Increment, I) 指载人航天器两次的发射间隔, 时长 2 至 6 个月不等; 规划周期 (Planning Period, PP) 指规划时所考虑的时间长度, 可表示一个标准的空间站规划周期, 通常包括四个 I, 持续时间从当年首次载人发射到次年首次载人发射.

3.1.1 时间分阶段规划

时间分阶段规划即在时间上采用分段概念将长时间的连续环境划分为一系列离散、可管理的单元, 将长周期任务规划问题转化为战略级、战术级、任务级和执行级四个阶段层级的多任务规划问题. 四个层级均以规划周期为时间基准, 采用倒计时制, 上层级输出为下层级输入, 下层级的结果反馈给上层级, 规划信息动态更新到规划过程中. 战略和战术级规划由各方共同制订高级别年度计划. 任务和执行级规划统称为增量级规划, 由各方根据共识独立地制订. 四个层级的时间关系和主要输出内容如图 4 所示^[52], 图 4 中 PPS-X 表示规划周期开始前的 X 月.

战略级规划 (Strategic Planning, SP) 始于规划周期开始的 5 年前. 该阶段提供未来 5 年内系统和资源情况, 制订长周期系统运行和应用计划. 主要内容是在 PPS-36 制订综合运行与应用计划 (Consolidated Operations and Utilization Plan, COUP), COUP 定义了系统运行和应用任务, 确定每年度各方获得的资源和载荷数量. SP 每年更新一次, 增加新的 P_5 并删除上一年的 P_1 , 细化 P_4 和 P_3 内容, 根据战术级规划反馈的信息更新 P_2 和 P_1 .

战术级规划 (Tactical Planning, TP) 始于 PPS-30 即 COUP 发布 6 个月后, 覆盖一个规划周期即一年时间. 该阶段制订载荷更替、年度各增量资源分配等计划. 主要内容是在 PPS-18 制订增量定义与需求文档 (Increment Definitions Requirements Documents, IDRD), IDRD 包含任务周期内各增量的载荷

利用需求和资源分配等内容, 每 6 个月更新一次。

任务级规划 (Pre-increment Planning) 始于 PPS-18 即 IDRD 发布, 持续到增量执行。该阶段规划增量期的所有活动, 主要内容是制订在轨操作概要 (On-orbit Operation Summary, OOS), 其通过提供整个增量期的预期可用资源、环境条件、限制因素、关键事件和任务请求, 指导增量期资源分配, 并产生每周内具体到天的活动清单。

执行级规划 (Increment Execution Planning) 又称增量执行规划, 是对任务级规划的进一步细化, 始于规划周期开始前 1 个月即 PPS-1, 在整个增量期执行, 主要内容是制订短期规划 (Short-Term Plan, STP), 其是一周内具体到时刻的系统和应用计划。为应对异常事件、优先级改变、机组活动等情况, 需不

断更新操作计划, 得到更细化的以小时为单位的在轨短期计划 OSTP (Onboard Short-Term Plan)。四个层级的开始时间、覆盖时段、输入内容、输出结果、与载荷任务规划相关内容列于表 3。

由表 3 可知, 战略规划阶段根据平台运行和资源情况, 设计高等级科学目标和对应载荷, 确定年度资源分配比例和任务需求与优先级; 在战略规划框架下, 战术规划阶段确定各增量任务期载荷及资源分配; 在战术规划基础上, 增量级阶段以天为时间基础, 制订各增量期载荷运行时间和资源分配。增量级规划是载荷任务规划的核心, 通过一定的规划方法分配资源以满足载荷工作需求, 产生一段时间内的活动日程。时间分阶段规划的优点是解决了连续操作环境下任务规划长期性、动态性和时间不一致问题, 缺点是

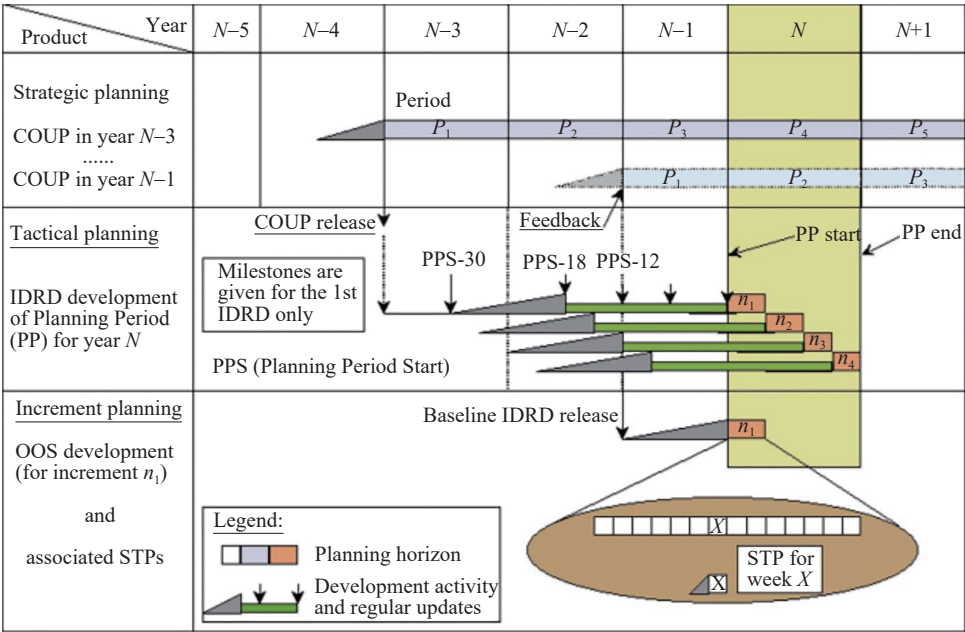


图 4 四个规划层级的时间关系和主要输出内容

Fig. 4 Temporal relationship and main output content of the four planning levels

表 3 四个规划层级的具体内容

Table 3 Specific content of the four planning levels

规划层级	开始时间	覆盖时段	输入内容	输出结果	与载荷任务规划相关的内容
战略级规划	PPS-60	5年	长周期空间站运行和资源信息	COUP	规划准则与约束、长周期应用计划、高层级载荷项目清单与年度资源分配
战术级规划	PPS-30	1年	平台资源信息、载荷利用需求、COUP	IDRD	任务优先级、各增量期载荷清单与资源分配
任务级规划	PPS-18	增量期	IDRD	OOS	每日载荷工作计划
执行级规划	PPS-1	每天	OOS、临近任务开始的资源信息	STP, OSTP	一周内具体到时刻的载荷工作日程

当前的资源分配和操作进度变更会对下个周期规划产生影响, 导致载荷工作和资源利用冲突问题。

3.1.2 资源分层级规划

资源分层级规划是将涉及的载荷用户、规划人员等规划功能划分到不同层次, 特定层次的功能在一个或多个组织中执行, 通过资源需求和资源分配上下行交互实现任务规划。图 5 所示包含上层、中间层和底层三个资源分层级规划单元^[53]。

上层规划单元为规划人员, 总负责载荷运行计划, 只有一个; 中间层规划单元为上层和底层间接口, 代表载荷赞助方; 底层规划单元为载荷用户, 有载荷工作需求, 并相互竞争支持工作的有限资源。各层间通过与时间独立的资源请求和与时间相关的资源分配进行上下行交互。运行机制是资源需求从底层通过中间层传递到上层, 上层规划单元考虑所有资源需求及其可用性, 将资源以资源信封形式通过中间层分配

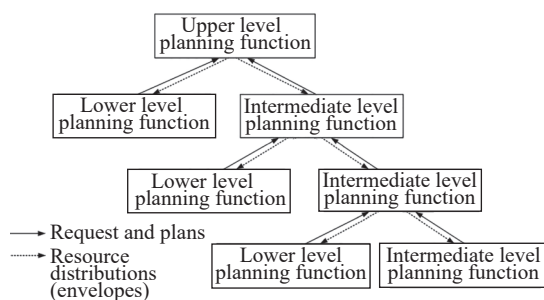


图 5 分层规划结构

Fig. 5 Layered planning structure

至底层, 底层用户根据可用资源创建计划并上传至上层规划单元。分层规划的优点是支持掌握专业知识的多用户充分参与到规划过程中, 解决了由于载荷专业性而导致无法由单一组织规划的问题; 通过资源请求和信封的形式保持规划的无冲突性, 通过对需求的统筹考虑确保资源的合理分配; 缺点是考虑裕量的资源信封会导致资源利用率低、所有层级的参与导致规划耗时、需要大量的信息协调以定义规划约束和确定方案。

3.1.3 空间分布式规划

空间分布式规划即分布在不同地理位置的多个规划组织参与集成规划的制订。ISS 各参与方都是一个相对独立的规划实体, 美国方面由约翰逊空间中心 JSC 制订并集成系统与载荷规划, 马歇尔空间中心有效载荷操作中心 MSFC-POIC 为 ISS 应用枢纽, 集成舱外和舱内所有载荷规划^[54], 俄罗斯联邦航天局 RASA、日本国家航天发展局 NASDA、欧洲航天局 ESA 和加拿大航天局 CSA 以及载荷用户规划各自的载荷活动。图 6 为任务级规划架构^[51]。

规划过程是用户向 POIC 提供需求文档 IDRD、基本准则和约束 GR&C 等信息, POIC 接收活动约束和需求并与 JSC 协调, 形成输入需求、环境信息及资源约束, 使用规划工具将活动分配到区间内, 为活动分配特定的起止时间与资源; 各方根据载荷规划 GR&C 在各自资源范围内分别制订在轨操作概要 OOS; POIC 集成各单位 OOS, 形成一个无冲突的载

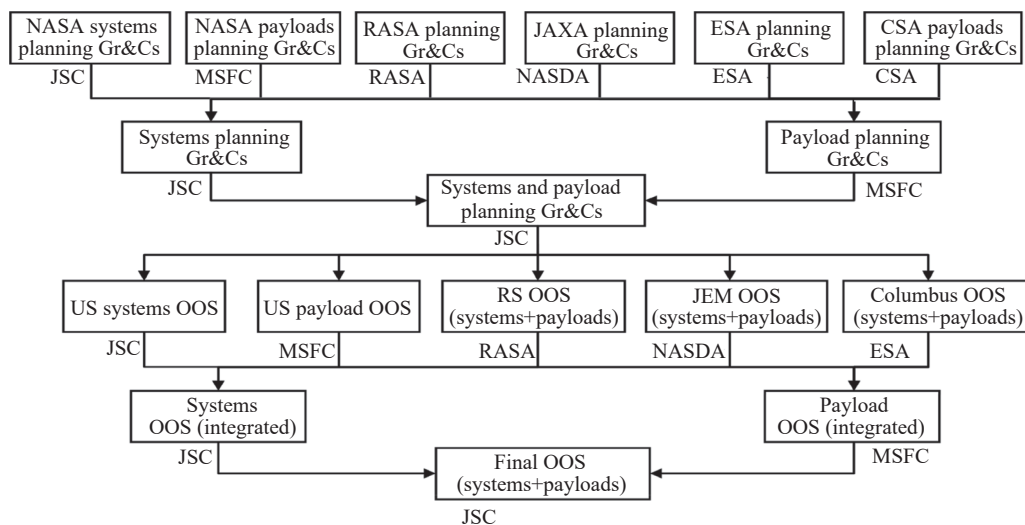


图 6 ISS 任务级规划架构

Fig. 6 ISS mission-level planning architecture

荷操作时间序列^[55]. 分布式规划的优点是各方在商定的资源范围内相对独立地开展各自舱段及其载荷的规划工作, 缺点是不同组织具有独特的运行环境 and 要求, 存在不同的预算周期和开发计划等; 系统高度依赖规划概念的变化、平台系统等外部因素.

3.2 ISS 载荷任务规划系统

ISS 载荷任务规划系统 (Payload Planning System, PPS) 是 POIC 用于规划 ISS 载荷运行的软件系统, 为 ISS 核心规划系统之一, 以 Lockheed Martin 公司开发的综合规划系统 (Consolidated Planning System, CPS) 为基础. CPS 系统是生成时间表的交互式规划和资源管理软件, 用于资源、约束、环境、活动和序列建模及自动规划^[56], ISS 参与方在一定程度上都使用 CPS 组件作为通用规划工具, 基于其日本开发了 JEM 规划系统 J-EPS, ESA 开发了操作准备和规划系统 (Operations Preparation and Planning System, OPPTS), 用于载荷任务规划. CPS 系统的资源分配方法为装箱算法^[57], 即将特定区间的可用性资源抽象为表示资源大小的最大、最小和平均值, 装箱算法将资源需求看作一个 n 维的包、放置在表示该区间资源可用性的 n 维箱子之中, 从而将活动分配到区间内^[58].

PPS 系统用于定义和处理用户需求、活动规划与资源配置, 用于美国的载荷规划、集成 ISS 整体载荷规划, 是开发 OOS, STP, OSTP 等的分布式工具, 主要用户是 MSFC 规划团队、载荷用户和其他操作者. 图 7 给出了 PPS 系统架构, 包括用户需求收集与集成、综合规划系统和数据库等模块^[59].

(1) 用户需求收集模块 (User Requirements Collection, URC). 用于用户检索、提交与验证规划需求并输出报告. 为避免系统约束建模的复杂性, 规划团队开发该模块以提供基本需求的选择, 包括活动序列、重复需求、时间关系、资源和条件需求等; 用户从预定义的选择列表中远程选择和提交规划需求来构建活动, 并存储在 PPS 数据库中.

(2) 用户需求集成模块 (User Requirements Integration, URI). 用于自动将用户的简化约束转换为详细的 ISS 系统约束, 避免手工转换过程的费时和繁琐操作, URI 和 URC 两个模块主要用于载荷科学需求建模; 输出 (Export) 为自动执行活动约束的派生过程, 启用上载程序将活动导出到 CPS 数据库中,

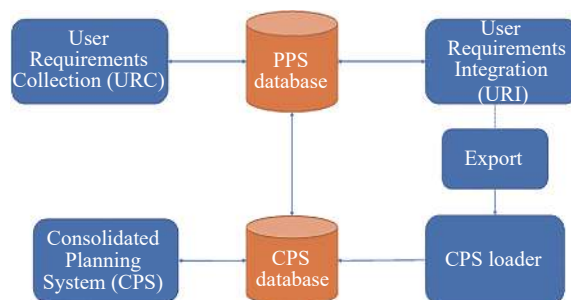


图 7 PPS 系统构架

Fig. 7 PPS system architecture

将 URC 约束一致性地转换为 CPS 约束.

(3) 综合规划系统. 用于资源约束建模、综合规划, 包含为每个活动分配开始和结束时间建立时间线的调度引擎, 同时记录约束条件的使用和可用性.

近年来, 在 CPS 系统基础上, ISS 研究团队在数据收集、用户需求描述与预处理、规划策略与方法等方面取得进展. 比利时用户支持和运营中心 2012 年开发基于 web 和运行轨道数据预测太阳能可见度窗口的工具 Predictor^[60], 以在外部约束限制下最大限度提高科学回报. 基于该工具又提出可拓展通用工具 Generic Planning Tool, 可针对舱内实验柜和舱外多个不同载荷进行需求的通用格式描述和基于定义约束的科学任务规划^[61]. NASA 于 2014 年开发替代 CPS 系统的运行规划时间线集成系统 OPTIMIS, 该系统由 SCORE、WebAD 和 Viewer 模块组成, 分别用于运行操作、规划数据收集和运行时间表显示, 但存在规划更新耗时、灵活性低、易引入人为错误等问题^[62]. 接着, 于 2018 年提出时间线集成摘要系统 TIPS, 具有面向不同学科、允许用户修改请求、定制报告等功能, 优化了重规划速度^[63]. JPL 研究提出压缩大规模规划器 CLASP 系统^[64], 强调利用几何约束进行规划, 将基于约束的载荷设备时间窗口与感兴趣区域相交, 目标是选择多个开关机时间以观测尽可能多区域, 使用优先级和 Squeaky Wheel Optimization algorithm 算法求解, 并支持多种优化算法^[65], 应用在舱外载荷 ECOSTRESS^[66] 和 OCO-3^[67] 等任务中, 优化了规划时间表.

3.3 ISS 载荷任务规划特点

(1) 在规划总体方案方面, 任务规划采取分阶段方法, 以增量为周期, 开始于空间站建造前期, 按照由远及近的原则从战略、战术和任务执行层面分阶段对

任务进行长期、中期和短期规划, 并对研究项目进行滚动征集.

(2) 在规划流程方面, 采取分层级和分布式方法, 通过分布式用户自下而上向上传递需求、规划团队自上而下分配资源实现资源的统筹合理分配.

(3) 在规划内容方面, 以科学成果产出最大化为原则, 约束条件通常是乘员时间、电能、热控、数传、通信覆盖等有限资源, 规划目标是最大化满足科学、商业、军事和教育需求, 最大限度减少载荷间工作冲突. 有约束条件的多目标优化问题一般可归纳为旅行商问题、装箱问题等, 并用优化算法求解.

ISS 舱外载荷任务规划方法解决了具有多学科需求、资源有限、任务长期性和动态性的复杂空间任务规划问题, 降低了规划复杂度, 保障了任务的成功实施和科学目标的完成, 说明对于基于空间站平台的大规模、多学科载荷运行任务可采取分段、分层和分布式规划, 但同时也存在资源利用率低、系统间接口定义与协调繁杂、软件与数据更新不一致等问题. 当前 MSFC 正研发支持强大建模能力、自动规划能力的模块化、可拓展、可定制的规划系统, 减少执行规划所需的专业知识, 最大限度对需求和约束建模, 提高载荷利用率, 从而加强空间站的综合利用.

4 结语

ISS 舱外载荷任务规划方法可为中国相关研究提供经验. 同时, 中国空间站 (China's Space Station, CSS) 在载荷平台数量、多学科研究、应用资源支持、任务规划和运营管理等方面具有显著优势.

CSS 在舱外载荷平台方面存在以下三方面特点.

(1) 多平台工位: CSS 三舱共设置 3 个大型载荷挂点 (核心舱 1 个、实验舱 I 2 个) 和 52 个标准载荷工位接口, 其中实验舱 I 22 个、实验舱 II 30 个, 如图 8 所示^[2], I 型载荷适配器不提供流体散热, II 型载荷适配器提供流体散热.

(2) 多方位布局: 在资源舱、气闸舱、工作舱和载荷舱的迎风、背风、朝天和对地各方位均设置适配器, 满足不同方位和指向的空间天文与环境、空间地球观测、空间应用新技术和空间科学实验等多学科需求.

(3) 优越应用资源支持: 提供机械、供电、流体回路散热和信息管理等应用资源, 提供材料暴露、生物学暴露、元器件与组件暴露通用实验装置, 并具有工作环境控制、在轨图像监测等能力.

在任务规划和运行方面, CSS 舱外载荷是面向国际参与、由中国载人航天工程空间应用系统统一规划和支持运行的, 可有效避免因系统不一致导致的大量接口协调和资源利用率低等问题. 相对于传统的载荷任务规划, 空间站运行的长期性、平台资源的关联性、空间环境的复杂性以及舱外载荷的多学科、多载荷、多模式、多需求等特点, 使得任务规划面临新挑战, 规划方法仍需深入研究. 为充分发挥 CSS 应用优势, 取得更多、更好的科学成果, 基于先前载荷任务规划经验, 在跟踪 ISS 规划技术的基础上, 未来空间站等大型航天器载荷任务规划系统可从载荷总体设计和运行任务规划方法两方面开展研究.

(1) 在载荷总体设计方面, 目前在轨的舱外载荷主要为空间科学实验和空间环境监测载荷, 可利用 CSS 近地运行轨道的特点, 以当前学科发展为牵引, 论证部署更多的对地观测载荷和空间天文载荷, 以发

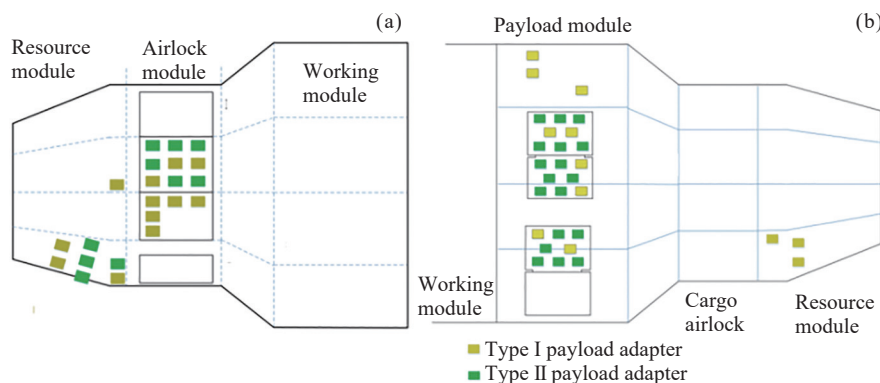


图 8 实验舱 I (a) 和实验舱 II (b) 舱外载荷适配器布局

Fig. 8 Layout of external payload adapters for experiment module I (a) and experiment module II (b)

挥舱外平台特点, 并提高平台利用率. 同时从总体角度, 需研究轻量化、低功耗载荷技术, 降低载荷在轨运行资源需求, 以进一步提高多载荷系统工作效率.

(2) 在运行任务规划方法方面, 需对多学科载荷任务进行需求分析和通用化描述, 以满足不同学科的舱内/外载荷运行规划需求; 研究具有不同时间长度、不同工作约束的任务处理方法, 基于运筹学规划理论建立具有灵活性、收益最大化的多目标规划模型, 进一步降低资源分配裕度, 提高资源利用率; 研究优化算法以从求解方法角度进一步提高规划方案的优异性.

CSS 已进入应用与发展阶段, 成为支持开展空间生命科学与人体研究、微重力物理科学、空间天文和地球科学、空间新技术与应用研究的国家级太空实验室, 为国内外科学家开展长期、多领域的空间科学、技术与应用研究提供历史性机遇. 舱外载荷将重点支持开展空间辐射生物学与诱变研究、空间应用材料使役行为研究、空间天文与天体物理、空间地球科学和空间物理、元器件与组件空间效应机理研究、空间信息与精密测量新技术研究等, 对舱外载荷任务规划开展创新研究是实现多学科科学目标的前提和关键技术之一. 面向复杂空间任务的载荷规划系统将有效提高平台资源和载荷利用率, 实现科学应用产出及其效益最大化, 对于充分发挥国家太空实验室平台作用和推动中国载人航天工程为空间科学研究做出更大贡献具有重大意义.

参考文献

- [1] GAO M, ZHAO G H, GU Y D. Recent progress in space science and applications of China's Space Station in 2020-2022[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 503-510
- [2] CHINA Manned Space Agency. Scientific Experiment Resource Manual of China's Space Station[R]. Beijing: China Manned Space Agency, 2019
- [3] NAHAY E. Space Station payload operations-The challenge of segmented planning in a continuous operations environment[C]//Space Programs and Technologies Conference. Huntsville: AIAA, 1995: 3536
- [4] COOLEY V M. Unique offerings of the ISS as an Earth observing platform[C]//International Astronautical Congress. Bei-jing: IAF, 2013
- [5] THIBEAULT S A, COOKE S A, ASHE M P, *et al*. MISSE-X: an ISS external platform for space environmental studies in the post-shuttle era[C]//2011 Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2011: 1-13
- [6] SOROKIN I V, KONOSHENKO V P, MARKOV A V. Research potential of the ISS *Nauka* module[J]. *Acta Astronautica*, 2022, **198**: 777-784
- [7] JOHNSON Space Center. External Payloads Proposer's Guide to the International Space Station[R]. Houston: Johnson Space Center, 2016
- [8] CORLEY B, STEIMLE C. New Bartolomeo payload platform on the International Space Station[C]//AIAA SCITECH 20-22 Forum. San Diego: AIAA, 2022
- [9] KAWASAKI K. Overview of JEM-EF on ISS[C]//Proceedings of the RIKEN Symposium. Saitama: JAXA, 2008: 1-3
- [10] BACHOLLE S, BARRILLON P, BATTISTI M, *et al*. Mini-EUSO mission to study Earth UV emissions on board the ISS[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2021, **253**(2): 36
- [11] BECKETT K. UrtheCast second-generation EARTH observation sensors[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, **XL-7/W3**: 1069-1073
- [12] BERGER T, HAJEK M, BILSKI P, *et al*. Cosmic radiation exposure of biological test systems during the EXPOSE-R mission[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2015, **14**(1): 27-32
- [13] PIKE S N, NEGORO H, TOMSICK J A, *et al*. MAXI and NuSTAR observations of the faint X-ray transient MAXI J1848015 in the GLIMPSE-C01 Cluster[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **927**(2): 190
- [14] ZUCCON P. AMS-02 experiment: status and perspectives[J]. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 2019, **306-308**: 74-79
- [15] ASAOKA Y, OZAWA S, TORII S, *et al*. On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS[J]. *Astroparticle Physics*, 2018, **100**: 29-37
- [16] ZHANG H G, ANGELASZEK D, COPLEY M, *et al*. Performance of the ISS-CREAM calorimeter in a calibration beam test[J]. *Astroparticle Physics*, 2021, **130**: 102583
- [17] ARZOUMANIAN Z, GENDREAU K C, BAKER C L, *et al*. The Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER): mission definition[C]//Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray. Montréal, Quebec, Canada: SPIE, 2014: 579-587
- [18] BROWN P, ENGELMANN A. TSIS experiences with ISS Jitter from inception to On-Orbit Operation[C]//Annual Guidance and Control Conference. Breckenridge, Colorado, USA: AAS, 2019
- [19] OBARA T. Space environment data acquisition with KIBO exposed facility on the International Space Station (ISS)[J]. *Electronics Communications in Japan*, 2012, **95**(9): 10-16
- [20] MARIEN G, JACOBS C, MICHEL A, *et al*. SOLAR, 9 years of operations as external payload on the ISS: The technical challenges overcome[C]//2018 SpaceOps Conference. Marseille: AIAA, 2018
- [21] SAKAIZAWA D, MITSUHAHI R, MUROOKA J, *et al*.

- Current status of the ISS-vegetation lidar Mission-MOLI [C]//IG-ARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE, 2018: 1861-1864
- [22] GUZMÁN R, DAVIS S, OCERIN E, *et al.* In-Orbit demonstration of the iSIM-170 optical payload onboard the ISS[C]//S-mall Satellite Conference. Logan: Utah State University, 2020
- [23] BLAKESLEE R J, LANG T J, KOSHAK W J, *et al.* Three years of the Lightning Imaging Sensor on-board the International Space Station: expanded global coverage and enhanced applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(16): e2020JD032918
- [24] LILES K A K, AMUNDSEN R M, DAVIS W T, *et al.* Thermal design and analysis of an ISS science payload-SAGE III on ISS[C]//47th International Conference on Environmental Systems. Charleston: ICES, 2017
- [25] MÜLLER R, AVBELJ J, CARMONA E, *et al.* The new hyperspectral sensor DESIS on the multi-payload platform MUS-ES installed on the ISS[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, **XLI-B1**: 461-467
- [26] NEUBERT T, ØSTGAARD N, REGLERO V, *et al.* The ASIM mission on the International Space Station[J]. *Space Science Reviews*, 2019, **215**(2): 26
- [27] YELAMANCHILI A, CHIEN S, CAWSE-NICHOLSON K, *et al.* Automated policy-based scheduling for the ECOSTRESS mission[C]//Earth Science Technology Forum. Pasadena: NASA, 2019
- [28] DUBAYAH R, BLAIR J B, GOETZ S, *et al.* The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography[J]. *Science of remote sensing*, 2020, **1**: 100002
- [29] BASILIO R R, BENNETT M W, ELDERING A, *et al.* Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3), remote sensing from the International Space Station (ISS)[C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIII. Strasbourg, France: SPIE, 2019, 11151: 42-55
- [30] MATSUNAGA T, IWASAKI A, TACHIKAWA T, *et al.* Hyperspectral Imager Suite (HISUI): its launch and current status[C]//IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE, 2020: 3272-3273
- [31] GREEN R O. The NASA Earth venture instrument, Earth surface Mineral dust source investigation (EMIT)[C]//IG-ARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2022: 5004-5006
- [32] SHIOTANI M, SAITO A, SAKAZAKI T, *et al.* A proposal for satellite observation of the whole atmosphere-Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES-2)[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE, 2019: 8788-8791
- [33] HU C M. Hyperspectral reflectance spectra of floating matters derived from Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO) observations[J]. *Earth System Science Data*, 2022, **14**(3): 1183-1192
- [34] YORKS J E, SELMER P A, KUPCHOCK A, *et al.* Aerosol and cloud detection using machine learning algorithms and space-based lidar data[J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(5): 606
- [35] DURDEN S L, PERKOVIC-MARTIN D. The RapidScan ocean winds scatterometer: A radar system engineering perspective[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2017, **5**(3): 36-43
- [36] MURI P, RUNCO S, FONTANOT C, *et al.* The high definition earth viewing (HDEV) payload[C]//2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2017: 1-7
- [37] WICKERT J, CARDELLACH E, MARTÍN-NEIRA M, *et al.* Geros-ISS: GNSS reflectometry, radio occultation, and scatterometry onboard the international space station [J]. *IEEE Journal of selected topics in applied Earth observations and Remote Sensing*, 2016, **9**(10): 4552-4581
- [38] ROFFE S, SCHWARZ T, COOK T, *et al.* CASPR: Autonomous sensor processing experiment for STPH7[C]//Proceedings of the AIAA/USU Small Satellite Conference. Logan: Utah State University, 2020
- [39] BROWN S, FOCARDI P, KITTYAKARA A, *et al.* The COWVR Mission: Demonstrating the capability of a new generation of small satellite weather sensors[C]//2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2017: 1-7
- [40] AOKI T, HIGUCHI K, WATANABE K, *et al.* Progress report of simple space experiment project on ISS Japan experiment module[J]. *Transactions of The Japan Society For Aeronautical And Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2014, **12**(ists29): Tc_1-Tc_6
- [41] AKAGI H, TAKATA M, WATANABE H, *et al.* Kibo's contribution to broadening the possibilities for micro-satellite[C]//2016 SpaceOps Conference. Deajeon: AIAA, 2016
- [42] ANZ-MEADOR P, WARD M, MANIS A, *et al.* The space debris sensor experiment[C]//International Orbital Debris (IOC) Conference. Sugar Land, Texas, USA: NASA, 2019
- [43] TOMLINSON Z, GALLAGHER W, CASSIDY J, *et al.* Lessons for Future In-Space Telerobotic Servicing from Robotic Re-fueling Mission[C]//2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2022: 1-17
- [44] SINDIY O, ABRAHAMSON M, BISWAS A, *et al.* Lessons learned from Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) mission operations[C]//AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition. Los Angeles: AIAA, 2015
- [45] REINHART R C, KACPURA T J, JOHNSON S K, *et al.* NASA's space communications and navigation test bed aboard the international space station[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, **28**(4): 4-15
- [46] RABOW E, RETTBERG P, BARCZYK S, *et al.* EXPOSE-E: an ESA astrobiology mission 1.5 years in space

- [J]. *Astrobiology*, 2012, **12**(5): 374-386
- [47] RABOW E, RETTBERG P, BARCZYK S, *et al.* The astrobiological mission EXPOSE-R on board of the International Space Station[J]. *International Journal of Astrobiology*, 2015, **14**(1): 3-16
- [48] RABOW E, RETTBERG P, PARPART A, *et al.* EXPOSE-R2: the astrobiological ESA mission on board of the International Space Station[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **8**: 1533
- [49] YAMAGISHI A, HASHIMOTO H, YANO H, *et al.* Four-year operation of Tanpopo: astrobiology exposure and micrometeoroid capture experiments on the JEM exposed facility of the International Space Station[J]. *Astrobiology*, 2021, **21**(12): 1461-1472
- [50] GU Yidong. Thoughts on space science development[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, **37**(8): 1031-1049 (顾逸东. 关于空间科学发展的一些思考 [J]. 中国科学院院刊, 2022, **37**(8): 1031-1049)
- [51] POPOV A. Mission planning on the international space station program, concepts and systems[C]//2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2003: 3427-3434
- [52] LEUTTGENS R, VOLPP J. Operations planning for the International Space Station[J]. *ESA bulletin*, 1998, **94**: 1-7
- [53] HAGOPIAN J, MAXWELL T, REED T. A distributed planning concept for Space Station payload operations [C]//NASA Conference Publication. Washington: NASA, 1994: 287-294
- [54] HORVATH T, GRIMALDI R, MORRIS D, *et al.* History of POIC capabilities and limitations to conduct International Space Station payload operations[C]//AIAA Space 2011 Conference and Exposition. Long Beach: AIAA, 2011
- [55] MAXWELL T G. Lessons learned in developing multiple distributed planning systems for the International Space Station [C]//2002 SpaceOps Conference. Houston: AIAA, 2002
- [56] SAINT R. Lessons learned in developing an international planning software system[C]//2002 SpaceOps Conference. Houston: AIAA, 2002
- [57] MAXWELL T, HOWELL E. Planning as a precursor to scheduling for Space Station payload operations[C]//Space Programs and Technologies Conference. Huntsville: AIAA, 1995
- [58] ZHANG Zexu, LI Ruixue. Progress and enlightenment of intelligent on-orbit operation of International Space Station[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, **41**(1): 118-128 (张泽旭, 李瑞雪. 国际空间站智能在轨运行进展及启示 [J]. *空间科学学报*, 2021, **41**(1): 118-128)
- [59] MUERY K, FOSHEE M, MARSH A. Automated derivation of complex system constraints from user requirements[C]//2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT'06). Pasadena: IEEE, 2006: 6-412
- [60] KLAI S, MICHEL A, MOREAU D, *et al.* SOLAR Predictor: A knowledge management tool supporting long term console operations[C]//2014 SpaceOps Conference. Pasadena: AIAA, 2014
- [61] STRUYVEN K, BRUN N, DIAZ A. A planning tool for ISS payload operations and preparations[C]//2018 SpaceOps Conference. Marseille: AIAA, 2018
- [62] LEUOTH K, SABATH D, SOELLNER G. Consolidating Columbus operations and looking for new frontiers[C]//International Astronautical Congress. Jerusalem, Israel: IAF, 2015
- [63] PEDOTO R, ALBERS C M, BENJAMIN D, *et al.* Innovative development of a cross-center timeline planning tool[C]//2018 SpaceOps Conference. Marseille: AIAA, 2018
- [64] KNIGHT R, HU S. Compressed Large-scale Activity Scheduling and Planning (CLASP) applied to DESDynI [C]//Proceedings of the Sixth International Workshop in Planning and Scheduling for Space (IWPSS-2009). Pasadena, California: Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 2009
- [65] DOUBLEDAY J R. Three petabytes or bust: planning science observations for NISAR[C]//Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV. New Delhi, India: SPIE, 2016: 1-7
- [66] YELAMANCHILI A, CHIEN S, MOY A, *et al.* Automated science scheduling for the ECOSTRESS mission [C]//Scheduling and Planning Applications Workshop. Berkeley, USA: ICAPS, 2019
- [67] YELAMANCHILI A, WELLS C, CHIEN S, *et al.* Scheduling and operations of the orbiting carbon observatory-3 mission[C]//Scheduling and Planning Applications Workshop. Guangzhou, China: ICAPS, 2021

作者简介



单亚东 男, 1995年8月生于河南省周口市. 现为中国科学院大学博士研究生, 培养单位为中国科学院空间应用工程与技术中心, 主要研究方向为复杂系统设计与优化.
E-mail: shanyadong18@csu.ac.cn



张汉勋 (通信作者) 男, 1971年4月生于河北省唐山市. 现为中国科学院空间应用工程与技术中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统总体设计、航天器热控制与热管理等.
E-mail: zhanghanxun@csu.ac.cn