



中国载人航天工程空间应用系统的工程生态分析

李丽仙¹, 高铭^{2,3*}, 王艺璇⁴, 许柱婷⁵

1. 中国科学院大学 人文学院, 北京 100049;
2. 中国科学院 空间应用工程与技术中心, 北京 100094;
3. 中国科学院大学 航空宇航学院, 北京 100049;
4. 中国科学技术大学 人文与社会科学科学学院, 合肥 230026;
5. 广西民族大学 科技史与科技文化研究院, 南宁 530006

摘要: 中国载人航天工程空间应用系统的任务目标是利用载人航天器的应用支持能力, 开展科学实验和应用研究, 推动和引领空间科学与应用领域跨越式发展。自 1992 年载人航天工程立项实施起, 即提出“造船为建站, 建站为应用”的发展理念。本文回顾了空间应用系统从载人飞船到空间实验室再到空间站三个阶段的发展历程, 总结了其在发展过程中的具体生态建构策略; 在此基础上, 基于工程生态视角从四个方面探讨了空间应用系统的生态建构的理论内涵: 从“工程管控”到“工程生态调控”; 深化数智融合, 提升生态效益; 竞合互动, 共创共生平衡; 微、中、宏观视角下的工程生态演化。期待本项研究有助于推动工程生态论概念建构与工程实践之间的“对话”。

关键词: 中国载人航天工程; 空间应用系统; 工程生态; 生态演化

中图分类号: N91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2025)01-0078-13

引言

我国已进入全面建成社会主义现代化强国新阶段, 开启了建设航天强国的新征程。中国空间站“天

和”核心舱发射之际, 习近平总书记在贺电中指出“建造空间站、建成国家太空实验室, 是实现我国载人航天工程‘三步走’战略的重要目标, 是建设科技强国、航天强国的重要引领性工程”^[1]。空间站的全

收稿日期: 2025-01-24; **修回日期:** 2025-01-29

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目“工程生态论的理论体系和实践研究”(2024-XZ-69)

作者简介: 李丽仙 (1991—), 女, 博士研究生, 研究方向为工程哲学。E-mail: lilixian@csu.ac.cn

*高铭 (1964—), 女, 研究员, 博士生导师, 国际宇航科学院院士, 中国载人航天工程运行与管理支持中心主任, 中国科学院空间应用工程与技术中心首任主任, 原中国载人航天工程空间应用系统总指挥, 研究方向为管理科学与工程、航天项目管理。E-mail: mgao@csu.ac.cn (通讯作者)

王艺璇 (1999—), 女, 博士研究生, 研究方向为工程史。

许柱婷 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为科学与社会。

引用格式: 李丽仙, 高铭, 王艺璇, 等. 中国载人航天工程空间应用系统的工程生态分析[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(1): 78-90. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250011. CSTR: 32282.14.JES.20250011

Li L X, Gao M, Wang Y X, et al. An Engineering Ecology Analysis of the Space Utilization System in China Manned Space[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(1): 78-90. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20250011. CSTR: 32282.14.JES.20250011

面建成标志着我国在空间科学、应用与技术领域达到了新的高度,展现了科技强国的雄厚实力。“空间应用系统”是空间站阶段载人航天工程的十四大系统之一^①,是核心组成部分。早在1992年载人航天工程立项之初,就把空间科学与应用作为落实工程发展战略的重要内容,提出“造船为建站,建站为应用”的发展理念。空间应用任务的主要目标是利用载人航天器的应用支持能力,开展科学实验和应用研究,推动和引领空间科学与应用领域跨越式发展,是我国迄今为止涉及学科最广、规模最大、内容最丰富的空间科学与应用实践^[2]。

工程生态论是工程研究的新范式,核心是以“生态”隐喻“工程”,将工程的“对象”、“结构”和“功能”视为具备“(类)生命”特征的“生命体”;同时,将工程系统看作是具有“广义生态特征”的“(类)生态系统”^[3-4]。工程生态概念的提出旨在从生态视角重新认识工程,梳理工程生态关系、关注工程的互联共生与动态融合,倡导新的工程观和方法论,助力工程实践的健康发展^[5]。工程生态理念在中国空间站应用系统的设计与建造过程中得到了充分体现,其作为一种新兴的工程哲学理念,超越了传统系统工程的范畴,不仅仅追求技术集成与效率提升,更强调在特定环境下形成一个能够自我调节、持续演进的生态系统。在中国空间站应用系统中,各组成部分经由复杂的交互作用与动态适配,共同构筑了一个完整的生态系统。这一以工程生态为导向的方法论,不仅增强了空间站在长期运行中的可靠性,更为未来持续产出高水平的科学与应用成果奠定了坚实基础。本文基于中国空间站的工程生态实践,深入剖析了其构建工程生态的具体策略,这是一次对航天工程设计理念的创新性探索,旨在为我国航天领域未来的可持续发展提供重要参考和借鉴。

1 载人航天工程空间应用系统的发展历程

根据载人航天工程“三步走”的战略目标,空间

应用系统同样经历了三个阶段的发展,体现出一种生态演进的动态特征,构建了从起步到成熟的完整生态体系。

1.1 载人飞船应用系统(1993—2005年)

一期载人航天工程的目标是“发射载人飞船,建成初步配套的试验性载人飞船工程,开展试验性应用”,通过实施4次无人飞行任务,以及神舟五号、神舟六号载人飞行任务,突破和掌握了载人天地往返技术,我国成为了第3个具有独立开展载人航天活动能力的国家^[6]。

对于应用系统而言,需要实现基础能力建设。应用系统于1993年成立了总体部,从“无”到“有”建成工程管理体系,并按照航天工程要求建立总体部-分系统-子系统的垂直管理结构,制定技术、质量、计划三条线的管理规定及规范,并积极探索与实践严格的工程化要求与科学研究的有机结合。在技术体系方面,以新的信息技术为支撑,实现了有效载荷在轨统一的供配电、监控管理以及科学数据采集、下载及服务;完成了分立有效载荷在轨运行总体方案的设计、测试和工程实施。

在一期的载人航天工程中,应用系统完成了201台全新有效载荷的研制,开展了67个课题的科学研究,攻克了70余项关键技术,创造了100多项具有自主知识产权的新技术、新方法,取得了六艘飞船应用试验的圆满成功。在载人航天工程的推动下,我国成功掌握了众多核心技术,并将大部分应用成果迅速转化为卫星应用的主力。例如,中分辨率成像光谱仪、地球辐射收支仪、太阳紫外探测器、太阳常数仪、微波辐射计、微波高度计和散射计等关键技术,都已被我国的业务卫星所采用,或成为计划中业务卫星的重要组成部分。这些成果不仅推动了先进科学技术的发展,更为经济社会的发展发挥了重要作用,产生了巨大的社会效益。

^① 载人航天工程一期由航天员、飞船应用、载人飞船、运载火箭、发射场、测控通信和着陆场七大系统组成,工程二期由八大系统组成,新增空间实验室系统,飞船应用系统更名为空间应用系统(文中简称“应用系统”);现已扩展为十四大系统,分别为航天员、空间应用、载人飞船、货运飞船、长征二号F运载火箭、长征七号运载火箭、长征五号B运载火箭、酒泉发射场、文昌发射场、测控通信、空间实验室、空间站、着陆场、光学舱系统。

1.2 空间实验室应用系统(2007—2019年)

二期载人航天工程的目标为“突破航天员出舱活动技术、空间飞行器的交会对接技术, 发射空间实验室, 解决有一定规模、短期有人照料的空间应用问题”。这一阶段, 空间实验室应用系统注重系统设计、规划与验证, 实现多任务目标融合、功能完备、性能先进的复杂大系统; 在运营管理上进行了深入的探索与实践, 形成了科学合理的运营管理模式和高效顺畅的组织运行机制, 并根据科学目标形成完善的工程管理体系、技术规范体系、系统标准体系, 为空间站的运营管理积累了丰富的经验。

在神舟七号、神舟八号载人飞船, 天宫一号、天宫二号空间实验室, 以及天舟一号货运飞船上开展了 50 余项空间科学实验。中德合作空间生命科学的 17 项实验、高等植物培养实验、空间干细胞增殖分化实验取得重要结果, 国际首台空间冷原子微波钟开展了原子激光冷却和操控实验, 取得迄今最高频率稳定度的实验结果。在中国-瑞士合作的伽马暴偏振探测仪中, 获取了国际最大样本伽马暴偏振度累积分布函数, 发现偏振度的时间变化新现象; 微波成像高度计作为国际首台采用小入射角-短基线干涉-孔径合成新体制的海洋科学观测设备, 开拓了海洋动力现象观测研究的新途径, 多角度偏振及宽波段光谱成像、紫外临边观测推动了对地观测和地球科学研究方法创新。总体来看, 空间实验室阶段取得了一批前沿科学成果和关键技术突破, 为后续开展大规模的空间科学与应用任务奠定了基础^[7]。

1.3 空间站应用系统(2010—预计 2035 年)

载人航天工程的第三步目标为“建造空间站, 解决有较大规模的、长期有人照料的空间应用问题”。2021 年, “天和”核心舱发射, 正式开启空间站建造阶段任务; 2022 年, “梦天”和“问天”实验舱相继入轨, 标志着中国空间站的全面建成。此后一年两艘载人飞船、两年三艘货运飞船为空间站持续补给物资、备件、科学实验载荷等。空间站具备航天员参与、天地往返运输等独特优势条件, 可在更广泛的学科领域内开展系统化的空间科学研究、具有特色的空

间应用和技术试验, 是推动我国空间科学与应用跨越发展的历史性机遇^[8]。

相较于载人飞船和空间实验室阶段的应用系统, 空间站应用系统是一个开放系统, 其在保障高可靠性、高安全性的基础上, 同时致力于提高空间站运行效率, 获取更高应用效益。空间站制定了重点突出、层次清晰的科学与应用任务规划, 包括空间生命与人体研究、微重力物理科学、空间天文与地球科学、空间新技术与应用四大研究领域及 32 个研究主题。在实验设施上, 建设了以舱内微重力科学实验柜为主、舱外先进试验装置的设施集群, 以支撑开展各领域专项实验研究, 并通过设备的维修、升级、更换和大型设施的在轨组装; 在支撑体系中, 打造了天地一体的实验支持平台, 建立了空间站地面镜像实验系统和跨学科、跨尺度、多模态、多物理场的数字实验系统, 实现了天-地协同、数字伴飞的实验研究新模式。应用系统的设施集群及支撑体系有效保障了空间站这一开放平台能够面向科技前沿与热点, 高效承载科学与应用实验项目, 实现快速迭代和自我拓展, 从而提升项目实施效率和项目成功率, 进一步增强空间站的整体运营效益。

截至 2024 年 12 月 1 日, 中国空间站已在轨实施 181 项科学与应用项目, 上行科学与应用任务近 2 t 实验模块、单元及样品等科学物资, 下行空间科学实验样品近百种, 获取科学数据超过 300 TB, 取得了国际上首次获得空间发育的水稻和再生稻新的种质资源、国际上首次实现空间人胚胎干细胞分化为造血干/前体细胞、国际上首次实现空间微重力条件下的冷原子干涉陀螺、国际上首个建立高通量在轨微生物防控试验平台等多项开创性成果^[9]。

空间应用系统经历 30 余年的发展和演进, 经历了从载人飞船和空间实验室阶段到空间站运营与发展阶段的重要转变。载人飞船应用系统中从“无”到“有”建立工程管理体系, 用系统工程方法制定工程技术、质量、计划规范, 构建生态雏形与基础; 空间实验室的应用系统处于生态发展中阶段, 建构完整的工程运行系统, 通过技术创新不断加强系统设计、载荷研制、集成测试、可靠性保障、有效载荷在轨管控管理、数据服务等能力; 空间站阶段的应用系统已呈

现出显著的生态特征,是开放的复杂大系统,借助各类实验设施和技术手段,建构完善的实验方法保障体系,产生不同的科学思想,孕育新的应用项目研究,不断涌现丰富的科学与应用成果。

2 空间站应用系统建构中的“生态”策略

在系统思维的引领下,应用系统在过去三十年的实践中取得了显著成就。空间站时代,在新阶段、新起点背景下,应用系统面临新的要求。在构建应用系统的工程生态过程中,必须超越系统思维,迈向生态思维。

2.1 “方寸”之间显身手,建设多学科实验设施集群

空间站开展科学实验和应用研究的方式有实验舱内的科学实验柜、舱外的暴露装置,还有舱内、舱外专门的独立载荷,以形成高效协同、动态适应的科学实验平台。其目标是构建多学科实验设施集群,以在有限的空间站使用空间站提高资源利用率。

“把实验室搬进太空”是应用系统无数科研人员经过无数次尝试和努力的结果,生命生态实验柜、流体物理实验柜、无容器材料实验柜、高精度时频实验柜、高微重力科学实验柜等实验设施以集群化布局为特色,将生命科学、材料科学、流体物理、燃烧研究和基础物理等多领域实验融入一体化平台。每一个科学实验柜都相当于一个标准的地面学科领域实验室,而柜子只有“方寸”大小——需要将其约束在对外接口统一、内部载荷接口规范、维修更换便捷、兼容国际标准的1820 mm×1050 mm×870 mm的立体空间中。这种集群化设计不仅实现了空间资源的高效利用,更通过设施间的协同整合提升了整体效能。空间站内的实验柜与模块实现了高度兼容和灵活性,空间站配置了12个学科方向实验柜和4个共用支持实验柜,能够满足90%以上相关科学领域的实验需求。空间站中科学实验柜整体比喻成房屋结构,分为基础支撑和科学实验两大系统单元。在基础支撑系统中,实验柜的

主体结构采用了轻便且牢固的房屋式设计,实验柜控制器则相当于房屋的中控室,实现了小型化、高可靠性的动态功率分配与管理,配备了4 Gb/s光纤入户及室内千兆以太网连接。热控抽屉相当于中央空调,具备气、液等多场环境下的自适应快速重构能力,以模块化方式进行热控管理。鉴于我国空间站的载荷质量约为国际空间站(ISS)的1/4,因此,高效的资源利用成为核心考量因素之一。通过这种集约化管理与资源优化配置的方式,空间站应用系统可支持1000个项目,科学研究项目支持效率为ISS的2倍以上,展现了在有限资源条件下的最大化利用能力,实现了在物理限制下的高效科研产出。

在多学科实验设施集群中,各实验模块如同生态系统中的“物种”,通过设施间的交互作用,形成了一个具有高度协作性的生态网络。科学家们可以在这一平台上突破学科界限,利用不同设施的资源优势,实现跨领域的融合创新。这种跨学科的协作模式,不仅为科技探索开辟了新的路径,还在设施与数据资源的共享过程中展现了开放性与包容性。

实验设施集群的适应性与可持续性,充分体现了生态理念在工程设计中的深层次应用。设施集群的布局 and 性能指标并非一成不变,而是具备动态调节和持续优化的能力。无论是在长期科学研究中满足多样化实验需求,还是在应对突发任务时迅速调整,展现出强大的生态韧性。这种基于生态思维的工程设计,确保了设施集群能够在复杂和变化的环境中长期稳定运转并不断优化和迭代。

2.2 滚动遴选与培育科学项目,夯实生态基础

空间站自2019年首次公开征集科学技术试(实)验和应用项目以来,收到500余个单位提出的超千项建议书,已有180余个空间科学研究与应用项目在轨实施。同时,开展天舟系列货运飞船和神舟系列载人飞船科学技术试(实)验和应用项目的征集,充分利用航天器上下行^①资源,滚动遴选与培育项目,不仅注重单个项目的技术突破,还关注其在系统整体中的协同效应和可持续性,每个项目不止其在科学上的前瞻性

^① 上下行为航天领域中常用术语,指上行和下行。“上行”指从地面到太空数据、信号或物资的传输过程,可以包括数据的发送、指令的上行传输,以及物资通过飞行器向太空运送,通常是支撑任务或科学实验。“下行”指从太空到地面数据、信号或物资的传输过程,可以包括数据返回地面、航天器传回的观测数据或资源运输回地球,主要用于分析结果或回收资源。

和技术上的先进性,同时能够与其他项目相互配合,共同推动空间科学与应用的整体发展。

项目遴选阶段,通过构建生态导向的筛选机制,优先遴选能对整体生态产生正向增益的项目。遵循科学上有贡献、技术上有突破、工程上可实现、经济上可承受的原则进行全面论证,并对项目科学目标与意义的生态适应性进行评估,关注其是否能促进资源的高效利用、技术的共享扩散及环境的正向影响。这意味着在项目遴选中,不仅仅局限于科学和技术的可行性,还特别考虑其对生态整体结构和功能的支持程度。具体流程包括指南编制与公告发布、项目建议书申报、形式审查、通讯评审和会议评审等环节,关键点涵盖项目的科学目标与意义、创新性、实验方案与工程可实现性、安全性、研究基础以及预期成果与效益等方面。

项目培育阶段,生态思维进一步体现在灵活的动态迁移与重组机制中。项目集群的发展从初期以项目指南为引导的征集模式,演化为自主涌现与科学群落聚集的模式。科研项目不再是孤立的单元,而是形成一个由多个项目协同驱动、涵盖基础研究到应用转化全链条的综合性生态网络。这种网络通过共享平台和开放机制,将学科、资源和技术高度融合,进一步增强了系统的适应性和抗脆弱性,推动了生态的良性循环。在空间站的最新实验中,在国际上首次开展了水稻从种子到种子全生命周期空间培养实验,水稻是人类主要的粮食作物,也是未来载人深空探测生命支持系统的主要候选粮食作物。利用空间微重力进行水稻育种也是空间植物学研究的重要方向之一。人类要在空间长期生存,就必须保证植物能够在空间成功繁殖种子。

项目集群将不仅聚焦于某一领域技术或产品的研发,更注重构建完整的产业链和生态系统,推动科研成果加速向现实生产力转化,吸引和聚集上下游企业,形成产业集群。通过生态导向的科技成果转化机制,可以有效促进科研成果向现实生产力转化,推动相关产业的转型升级。在空间站应用有效载荷数据通信规范中约定应用有效载荷与应用信息系统之间以及应用有效载荷与实验柜间的数据通信,最重要的创新是应用了光纤协议总线技术。该技术具有传输速率

高、时延小等优点,可以有效提高航天器网络的传输带宽和实时性,2011年在空间实验室任务中应用该技术为国内航天领域的首创。此后,科研团队基于此技术开展产业化,将该技术应用到智能网联汽车等领域。

通过将生态思维融入科学项目的遴选、培育和运营中,构建了一个具有自适应性、协同性和可持续性的生态系统,为未来的科学研究和技术进步奠定了坚实的基础。

2.3 实现天地镜像,打造一体化实验支持平台

空间站应用系统独创了“空间科学实验设施群+地面物理镜像平台+数字实验系统+复杂任务智能管控”的天地一体科学实验支持系统。这一创新的解决方案强调资源、技术与环境之间的动态适配与协同演化。地面物理镜像平台是一个在地面上与中国空间站平行运行的科学实验系统,其规模与功能均按照空间站的标准进行设计和建造^[10]。平台配备了14个科学实验柜,这些实验柜不仅能够满足各类科学实验的需求,还配备了相应的信息、配电、流体散热等舱内外公共支撑设备,确保实验过程的顺利进行。这些设施为科学家们在地面进行太空实验提供了强大的技术支持和保障。镜像平台是神舟和天舟飞船携带的科学载荷上天前的最终确认测试场所。所有即将进入空间站的科学实验设备,都需要在这里进行严格的测试,确保其在太空环境中的可靠性和稳定性。这一步骤对于保障空间站科学实验的成功至关重要,因为能够有效地减少因设备故障而导致的实验失败风险;同时,镜像平台还承担着科学实验方案提前验证的任务。科学家们可以对即将在空间站上进行的科学实验方案进行模拟验证,以检验其可行性和科学性。如果在轨科学实验出现故障,科学家们也可以即时进行故障的排查定位,并验证解决措施,从而避免或减少太空中的实验风险和损失;此外,镜像平台还支持天地比对实验。这是一种将空间站上的科学实验与地面实验进行同步开展、比对分析的研究方法。在同样的条件下,除了微重力环境的不同外,其他所有因素都保持一致。通过这种比对实验,科学家们可以更加深入地了解微重力环境对科学实验的影响,进而揭示太空中的

物理、化学、生物等科学现象的本质规律。

复杂任务智能管控系统可以高效辅助航天员进行日常维护、应急处理和科研活动, 大幅提高任务执行的灵活性和效率; 此外, 还建立了科学家在轨交互管控、空间与地面、数字与物理协同运行的平行系统, 可以使研究人员直接参与到实验过程中, 实现过程可控、可视, 解决面向科学实验动态变化所带来的迭代研制、持续集成、快速部署、无缝升级、快速扩展的难题以及强约束下不确定任务动态安排与敏捷优化控制难题, 为空间科学研究提供长期稳定的支持。

数字实验系统融合数据与模型, 建立了实验设施、环境和过程三者高度关联的高保真数字实验技术体系, 模型迭代求解周期达到ms级, 实现了全要素、全流程高精度仿真。通过数字实验系统, 研究人员能够全面掌握实验的每一个步骤和结果, 及时调整实验参数, 优化实验设计, 从而显著提高实验效率和成功率。如在金属锆的实验中, 无容器材料实验柜的数字实验系统扮演发挥了解决问题的重要作用。在科研人员眼中, 无容器材料实验柜是“太上老君的炼丹炉”, 凭借先进的静电悬浮技术, 创造出独特的“无容器”环境, 能让实验样品在完全悬浮的状态下进行熔炼, 有效防止了实验材料样品与实验腔体内表面的任何接触, 能够获得纯度更高且均匀的材料。应用系统建立的针对无容器科学实验系统装置的数字实验系统, 成功突破样品球释放回收、样品悬浮位置控制、高温激光加热熔化、冷凝和回收等关键技术。

通过整合地面与空间实验设施, 形成高度协同的研究环境, 实现多学科、多领域的深度融合, 为科研创新提供坚实支撑。这一平台的设计理念体现了生态思维的核心, 即各要素在复杂环境中能够相互依存、自主调整, 从而确保持续发展与稳定运行, 不仅提升了科研任务的智能规划与动态监控能力, 还极大地提高了实验效率和成功率。

2.4 汇聚多元人才, 搭建开放合作架构

在空间站应用系统中人才资源是核心竞争力的关键部分, 也是工程活动的策划者、执行者与维护者。通过多元人才的互动与合作, 形成支持长期创新和持续演进的生态, 推动科研成果的高效转化和技术进步,

构建了一个以生态思维为导向的人才与知识共享体系。

载人航天工程空间应用系统的作用在于能够将科学家的思想、需求, 通过深入分析, 转化为对载荷设备的技术要求, 变成工程可实现的语言, 建立从科学思想到工程实现的桥梁。空间站的建造和运行既是工程问题和科学问题, 更是科研管理的问题。科学认知制约着工程进展, 而工程实现也推动解决科学问题^[11]。这就要求科学家的广泛参与, 以确保各类科学需求能够得到充分表达与满足。此处所指的“科学家”并非仅限于单个或相近学科领域的专家, 而是涵盖了生命科学、微重力、基础物理、材料科学、空间天文等各类不同学科、不同领域的科学共同体。科学共同体的构建需要兼具广度与深度, 即既要广泛覆盖多学科领域以确保研究的全面性和多样性, 又要注重知识的深度融合, 深入挖掘各学科的心理理论和技术潜力。一方面, 它通过集聚来自不同学科领域的科学家, 形成跨界协同的研究网络, 促进知识的深度融合。例如, 生命科学和材料科学的交叉研究可以推动新型生物材料的研究, 而基础物理与空间天文的合作能够深化对宇宙规律的理解; 另一方面, 科学共同体聚集了各领域的科学家, 搭建了一个促进交流和知识共享的平台, 使得科学家之间的协作不仅是技术层面的对接, 更是创新思想的碰撞。通过这种方式, 各领域科学家得以在共同目标的指引下, 跨越学科边界, 实现科学与工程协同创新。随着空间站应用系统的不断发展, 科学共同体必将愈加多元化与国际化, 有助于解决前沿技术挑战, 推动新兴学科领域的突破性发现。

开放合作体系和多元人才框架也打破了传统科研活动的封闭局限, 实现了跨学科、多主体的深度协同, 显著提高了科研成果的转化速度和效益。

2.5 面向全球视野, 积极推进国际合作

通过共享资源、数据和技术, 推动跨国、跨地区的深度合作, 可以促进不同国家和地区的科研团队在全球视野下实现协同创新, 构建全球生态合作网络, 实现科研力量的高效整合与协作。在应用系统发展过程中, 中国与多个国家的航天机构和国际组织建立了广泛的合作关系, 形成了多层次、有重点、多元化的

合作网络,包括欧洲空间局(ESA)、联合国外层空间事务办公室(UNOOSA)、德国航空航天中心(DLR)、法国国家空间研究中心(CNES)、意大利航天局(ASI)、瑞士空间办公室以及巴基斯坦上层空间大气研究委员会等主要国际空间机构或组织,涉及了28个国家/地区的139个单位。通过建立协同工作机制和科学计划层面的合作框架,各方已签署了超过60份合作协议,旨在促进资源共享、技术交流及联合科研项目的开展。

此外,通过签署《利用中国空间站开展国际合作谅解备忘录》^[12],中国正式开启了空间站的国际合作新篇章。1993年国际空间站项目立项,中国就希望加入国际空间站。但美国以中国航天的水平低和军方背景为由反对中国加入,提出中国可以出资,但不能共享空间站技术的要求。2011年,美国国会颁布了一项名为“沃尔夫条款”的法案,该法案禁止中美两国间任何涉及美国航天局(NASA)或由白宫科技政策办公室协调的联合科研活动^[13]。与此同时,中国空间站向全球发出了登上“天宫”的邀请。在首批科研项目遴选阶段,中国共接收到来自欧美、亚非等27个国家的42份项目申请,并最终遴选出17个国家的9个项目成功入选^[14]。此举标志着中国空间站成为有史以来首个向所有联合国会员国开放的空间站项目。在合作过程中,中国不仅共享空间站实验舱资源,还免费提供合作项目的运输服务,为各国特别是发展中国家提供了进入太空、参与空间科学研究的机会。当前正在成立国际载人航天专家联盟,邀请并吸收来自全球逾40个国家200多家单位的600余位高水平国际专家开展项目合作、论证和咨询工作,形成大科学培育国际人才库。

全球生态合作网络的构建,不仅实现了物理资源的共享,更促进了思想、理念与创新模式的跨国融合。中德“神舟八号”空间生命科学合作项目集合了中德两国多家科研机构的科学家共同努力,实现了跨越国界的携手探索。德国提供的通用生物培养箱被成功搭载于中国的“神舟八号”飞船,这不仅是中国首次在载人航天任务中进行的国外设备搭载,也是德国首次利用中国运载火箭进行太空实验。双方在硬件资

源上的实质性共享,为双方带来了丰富的实验数据和科研经验。在实验设计、实施过程、数据收集与分析等方面,中德科学家们进行了密切的信息交流,加深了双方对空间生命科学的理解,促进了实验方法和科研管理经验的全面共享。

通过国际化合作,空间站应用系统在跨文化、跨技术和跨地域的背景下,与不同国家和地区形成了多维度的生态联动。这种合作促进了各参与方资源与能力的深度融合与互补,推动了更加高效和创新的协作模式,共同构建了一个互利共赢的生态系统。

2.6 构建数据生态系统,促进资源开放共享

为促进资源开放共享,应用系统在空间实验室阶段已开始布局 and 提供数据服务。2014年3月,天宫一号空间应用推广服务平台开通运行,为国内公益用户和国内外商业用户,以及个人公众用户提供了大量有价值的天宫一号应用数据及服务。在数据的公益使用方面,已经为包括国土资源部、农业部^①、交通运输部、住建部以及海洋局、地震局等在内的十几个部委,以及全国20余所高校提供服务^[15]。数据与资源的开放在积极为经济科技发展和社会公益服务的同时,也在商业化推广应用机制方面进行了多方位探索,为载人航天成果应用推广做出了有益尝试。

为进一步有效管理和利用这些宝贵的数据资产,空间站应用系统搭建了载人航天数据工程生态平台,并基于载人航天工程公有云平台正式对外上线,提供多领域空间科学数据的处理、分析、应用等一站式数据生态服务。载人航天工程数据生态平台致力于整合空间站应用任务所需的“数据、算力、算法”关键资源,构建起从“数据在线使用→应用研究→成果产出”的高效生态链^[16],并依托其强大的弹性伸缩、负载均衡和容错机制,确保容器隔离、访问控制、加密传输等多层次的安全机制,确保数据与成果的存储、传输和处理的完整性和保密性,通过开放算力、数据共享和协同工作,促进数据互联互通,推动跨组织共享与创新科研范式。

平台提供了丰富的数据集,包括来自空间站各类

① 2018年,国土资源部更名为自然资源部,农业部则调整为农业农村部。

实验设备的观测数据、实验数据, 涵盖空间生命科学、空间微重力物理科学和空间天文与地球科学等领域。平台定期发布涵盖实验进展、前沿研究技术和最新科研成果的多元资讯, 追踪科研领域的重大更新。并开放了大量的公开案例和实用工具, 帮助研究人员快速上手, 高效推进研究项目。为激发创新活力, 还提供用户论坛作为科研工作者交流思想、分享经验、互助合作的社区。此外, 平台也为载人航天工程科学数据分析与研究人员提供便捷的数据分析基础环境支持, 包括可共享复用、覆盖主流框架与工具的镜像, 满足分析训练需求的弹性算力调度, 可视化、Notebook、IDE等多种在线编程模式等。提供从数据接入管理、分析建模、模型训练、模型管理、发布应用、资源管理到数据分析任务管理的一站式服务, 提供基于模型的全生命周期管理。

为了进一步促进协同创新, 平台还组织了载人航天工程数据竞赛, 期望吸引来自不同科学领域的顶尖人才, 汇聚各方优势资源, 共同构建以人工智能和数据科学为支撑的科学研究新模式。载人航天工程数据生态平台旨在拓展数据创新应用的广度和深度, 挖掘数据的潜在价值, 加速空间科学与应用研究的创新进程和应用的广泛性, 为工程生态注入持久活力。

3 关于空间站应用生态建设的理论分析

空间站应用系统的建设与运营对于工程生态建构具有启示意义。

3.1 从“工程管控”到“工程生态调控”

载人航天工程经过三十余年的发展进入到崭新阶段, 空间站由建造期转向运营期, 随着相关技术尤其是人工智能技术的快速发展, 科研和管理需要保持弹性, 以适应时间周期缩短、变化加快等现状。传统的分阶段工程管控方式已无法满足当前需求, 亟须采用新的手段和方法, 在全任务周期和全生命周期中进行超前管理和预见未来。

因此, 由“管控”至“调控”的升维管理成为必然趋势, 这一转变不仅是当前技术发展推动下的工程模式升级, 也是工程生态视域中管理理念的革新, 更

是应对复杂工程挑战的必然要求。“工程生态调控”的核心在于利用现有人工智能、数字化等技术进行前瞻性管理, 以一种更加灵活、动态的管理模式, 在工程实施过程中保证目标确定性、系统可靠性, 在此中充分发挥科学研究的自主性和探索性。通过动态调整机制, 空间站能够根据实际需要快速调整资源配置和技术方案。这种灵活性可以更好地应对突发情况和激发新的科学发现, 提高空间站的整体运行效率。“工程生态调控”模式进一步超越了传统意义上的工程约束, 将管理焦点从传统的模样、初样、正样的严格进度要求转变为对全生命周期数字化平台的预测和调整。在这一模式下, 空间站被视为一个动态、开放、自适应的工程生态系统, 其中各种参与主体能够实现高度的互动协同和资源的高效共享。在传统的工程管控模式下, 空间站科学项目的立项后必须严格按照预定的工程节点逐步实施, 任何参数的改变都需要经过复杂的审批流程, 使得部分项目因工程要求限制而无法达到更高目标的科学成果或是部分有市场价值的项目可能因为时间或资源的限制而无法及时开展。在“工程生态调控”模式下, 项目实施理念正在逐步发生变化。首先, 地面培育和正式立项项目互相转化, 遴选中的项目不再完全遵循固定的工程时间节点表, 而是根据工作进展和科研价值进行动态评估, 每年至少有3次上行机会到空间站中; 其次, 智能化与数字化技术已成为实施项目的前置验证条件之一, 项目前期即可进行数字仿真和数字实验, 从而不断迭代和更新项目本身参数、设计甚至方案, 以采取更为灵活的实验方式。

“工程生态调控”模式突破了传统意义上的工程约束, 充分考虑动态、开放、自适应的工程生态系统。在这种模式下, 焦点不再是简单地监控进度和成本, 而是转变为对整个工程生态系统进行建设、维护与优化, 确保系统内部各种参与主体(包括人员、技术、资源等)能够实现高度的互动协同、资源的高效共享, 并能够主动适应内外部环境的变化。注重全局观和长期视角, 追求工程活动与周围生态环境的和谐共生, 而非单纯追求短期的工程目标。“工程生态调控”标志着工程系统向更加智慧化、生态化、可持续化方向的重要转变, 提升了空间站运营的灵活性和适应性, 是实现未来空间探索和发展的关键步骤。

3.2 深化数智融合, 提升生态效益

在生态学中, 生态效益的提升体现为生态系统在资源利用合理性、整体结构与功能稳定性和生物间相互关系协调性等多方面的全面优化与持续进步。聚焦于空间站运营场景, 智能化与数字化对于提升生态效益起到了关键作用。

空间站应用系统打通了 11 个平台, 破除信息孤岛, 数字化贯穿全工程全生命周期, 全面提升工程管理与研制抓总能力, 实时掌握工程研制状态。数字化同时打破了各科学与应用项目间的藩篱和边界, 促进了各学科、各领域之间的深度融合与协同合作。

首先, 优化资源配置是实现空间站可持续发展的基础, 充分考虑资源的循环利用和能量的高效转换, 确保每一项资源都能得到最大化利用。利用大数据分析机器学习技术, 更精准地识别出高回报项目, 将稀缺资源导向能够产生最大科研价值和社会效益的领域, 从而在源头上优化资源配置, 实现成本节约与效率提升的双赢; 其次, 数字化与智能化技术有助于营造和维持良好生态环境, 通过实时监测与数据分析, 精准掌控生态系统的运行状态, 及时发现并解决潜在问题。提前预知和超前管理能有效防范系统中存在的潜在风险, 提升系统的稳定性和可靠性, 智能化技术还能模拟不同场景下的生态响应, 为工程生态调控提供科学依据, 确保生态系统的稳定与健康。再者, 促进“物种”的协同进化也是提升生态效益的有效途径, 在空间站生态系统中, “物种”类比为空间站应用系统中的各个子系统、装置、设施等。通过数字化平台的集成与智能算法的应用, 促进“物种”之间的高效协作与密切配合, 并通过算法迭代持续优化协同流程, 提高配合度以及运营效率。

构建高度智能化与数字化驱动的工程生态系统, 实现资源高效利用、“物种”的协同进化以及自我优化, 为生态效益的提升和可持续发展奠定了坚实基础。

3.3 竞合互动, 共创共生平衡

在空间站应用系统这一复杂工程生态系统内, 由多元主体构成了立体网络, 这些主体不仅涵盖了技

术、科学和工程等跨领域的相关方, 还包括协作的科研机构、高校以及国际合作伙伴等, 各主体承载着不同的战略目标、技术能力与资源基础。这种差异化使得各主体间存在着竞争、合作与共生共存的多样互动, 但在其追求目标与任务实现的同时, 也需协同贡献于系统整体发展与技术突破, 从而达到系统的生态平衡状态, 这种竞合互动主要体现在三个层次:

首先, 在空间站应用系统内部, 不同科学项目之间的竞争尤为显著, 主要体现在对有限资源的争取, 包括上下行资源、能源供应和实验时间等。由于资源稀缺, 各项目需通过竞争来确保自身的实验需求得以满足。然而, 这种竞争并非单纯的对立关系, 通过合理的资源整合和跨学科协作, 不同项目之间也可以实现互利共赢。例如, 共享实验设备与数据能够减少重复投入, 加速核心技术突破, 优化资源使用效率。此外, 跨学科合作为知识共享与技术创新提供了平台, 有助于应对复杂的空间技术挑战。通过这种合作模式不仅提升了单一项目的研究效能, 还促进了整体系统的协调发展。

其次, 在平台层面, 空间站应用系统与工程其他系统也存在一定的竞争, 其中最明显体现在对上行资源的分配上。例如天舟八号搭载上行物资总重约 6 t, 装载了航天员系统、空间站系统, 以及空间应用系统和货运飞船系统共计 247 件货物。其中, 空间应用系统物资总质量 458 kg, 涵盖实验载荷、实验单元及样品、实验耗材、备品备件等在轨实验保障物资及共用支持类应用物资^[17]。同时, 为了最大化空间站的资源利用效率, 各系统间必须密切合作, 例如科学实验柜的设计、载荷与平台接口的匹配以及实验设备的安装与调试等, 这些环节的无缝对接与高效协作, 是确保实验设备能够顺利运行、科研任务得以圆满完成的关键。

最后, 在国际层面上, 中国空间站与国际空间站之间的竞争主要体现在前沿性科学研究和成果产出。各国科学家和研究机构在选择实验平台时, 通常会优先考虑平台的实验条件、资源供给和研究效率。为此, 中国空间站需不断提升技术水平与实验能力, 吸引更多国际科研项目的参与; 虽然目前中国空间站与国际空间站之间的直接合作较少, 但中国空间站依然

积极倡导国际合作,共享空间科学研究成果。通过深化国际交流与合作,广泛邀请全球科学家参与空间站的科学实验与研究,共同探索宇宙奥秘,构建一个开放包容、互利共赢的空间科学合作网络。

竞争,作为系统创新的重要驱动力之一,聚焦于稀缺资源的获取与利用效率上。不同主体在资源、人才和技术上的竞争,推动了技术的快速迭代和创新。这一竞争机制促使各主体不断审视并优化自身的战略定位与核心竞争力,以保持领先优势;合作则是这一生态系统的黏合剂,通过知识共享、联合研发以及协同攻关等强化了系统内部的信息流通与资源整合。在多层次的竞合互动中,共生共存的动态平衡状态逐渐形成。它强调各参与主体间相互依赖、互惠共赢的关系,形成了互补优势的闭环。在这一共生体系内,每一主体既是受益者也是贡献者,它们共同促进着空间站应用系统生态的繁荣与进化。

3.4 微、中、宏观视角下的工程生态演化

在空间站应用系统的发展中,微观层面的技术革新是生态演化的基础。2020—2024年,空间站规划了65个研究计划和180余项研究项目。这些项目通过滚动征集、遴选和实施的机制进行管理,确保每个项目都具有科学价值和可行性。例如,无容器材料实验系统利用高精度激光定位与加热技术,在微重力环境下进行材料科学研究,解决了高温熔体快速凝固等难题。这种技术革新不仅推动了单一项目的成功,还为其他相关项目的开展提供了技术支持,形成了技术创新的传导效应。具体项目的技术突破能够迅速扩展到整个项目集群,形成协同效应,促进更多创新成果的产生。

在中观层面上,不同学科领域形成了高度互动与协同的项目集群,涵盖了空间生命科学、空间材料科学、微重力流体物理与燃烧科学等多个学科领域。各领域项目群之间不仅促进了知识、技术和资源的共享与优化配置,还推动了科研创新从单点突破向全链条综合性进程转变。不同学科领域项目之间的高度互动与协同,通过共同攻关特定领域的科学问题,逐步递进并深入掌握其本质。例如,在空间生命科学研究中,多个项目聚焦于哺乳动物的代谢和遗传特性,共同探

索了哺乳动物在太空微重力环境下的代谢变化和遗传表达模式,还为理解人类在长期太空飞行中的生理适应机制提供了宝贵数据。这些研究不仅对航天医学有重要价值,也为地球上的医学研究提供了新的视角。

此外,不同项目通过资源的高效利用和共享、统一的支持平台、学科交叉以及团队协作,共同推动了科研创新的发展。例如,梦天实验舱中的高精度时频实验柜充分利用了空间站的独特微重力环境,研制出高性能的原子钟和高精度时频系统。而这一项目不仅对基础物理研究和工程应用作出了重要贡献,还可以在提高国家时间标准、增强导航系统的精度等方面发挥关键作用,促进了相关领域的进步,形成了一个良性循环。

在宏观层面上,空间站应用系统的生态演化是一个长期积累和精心规划的过程,涉及自主行动者之间的非线性相互作用。通过技术创新、管理创新和应用模式创新,实现持续稳定的生态演化,并最终转化为国家层面的战略优势。自1992年中国载人航天工程立项以来,已有4000余项成果广泛应用于国家各行各业。空间生命科学研究成果已直接应用于生物材料、药物、医疗和农业技术等领域,推动了生物技术的快速发展。微重力流体、燃烧和材料科学等方面的研究成果,有效突破了国家材料技术的关键瓶颈,部分成果已广泛应用于新能源汽车、智能终端设备的量产零部件中,为高端制造业注入科技动能。航天医学实验领域,开展了长期航天飞行条件下失重、辐射等复合因素对航天员健康、行为与能力的影响等原创性机理探索和应用基础研究,在人体心血管、骨骼等生理机理方面取得了重要突破,为地面医学提供了独特参考。

空间站应用系统宏观层面的生态演进,推动了新质生产力的形成与发展,为国民经济和社会进步注入了新动力。未来随着空间科技的进步和空间站功能的不断完善,空间站应用系统将开展更加深入和广泛的科学实验和技术验证,为人类探索宇宙和推动科技进步做出更大贡献。

空间站应用系统的生态演化是一个多维度、多层次的复杂过程。任何微观层面的变化都有可能迅速传递到中观乃至宏观层面,反之亦然。例如,一个具体

的科研项目如果取得了突破性进展,可能会引发一系列连锁反应,带动整个项目集群的发展,甚至影响到国家战略层面的决策。这种多维交互使得系统能够在不断变化的环境中保持灵活性和适应性。任何局域事件都有可能迅速升级为全局事件,从而发挥“牵一发而动全身”的作用。反过来,任何宏观层面的扰动,都会迅速直达每个局部而发挥统反作用。微观、中观和宏观在生态互动与演化中紧密相连。这种有机联系和互动关系体现了工程生态系统的复杂性和动态性,也展示了其强大的生命力和创新能力。

4 结语

本文全面回顾了载人航天工程空间应用系统从载人飞船、空间实验室到空间站的发展历程,探讨了在这一过程中空间应用系统所采取的生态建构策略,进而对其所蕴含的工程生态理论进行分析。研究表明,空间应用系统的生态构建不仅是一个从技术集成到系统优化的过程,更是一个从单一系统向复杂生态系统演进的动态过程。从载人飞船应用系统的初步建立,到空间实验室应用系统的系统设计与规划验证,再到空间站应用系统的开放与高效运行,每一步都体现了生态思维的深入应用。

空间应用系统生态构建的实质是从“工程管控”到“工程生态调控”的升级。通过引入智能化和数字

化技术,空间应用系统实现了对任务全生命周期中进行超前管理和预见。通过数字化平台的集成与智能算法的应用,空间应用系统实现了资源的高效利用和“物种”间的协同进化,形成了良性循环的生态系统。通过合理的资源整合和跨学科协作,不同项目之间实现了互利共赢,共同推动了空间科学与应用的整体发展。空间站应用系统的生态演化是一个多维度、多层次的复杂过程。任何微观层面的变化都有可能迅速传递到中观乃至宏观层面,任何宏观层面的扰动,都会迅速直达每个局部而发挥统反作用。微观、中观和宏观在生态互动与演化中紧密相连,这种多维交互的特性体现了工程生态系统的复杂性和动态性,也展示了其强大的生命力和创新能力。

中国载人航天工程空间应用系统的工程生态构建是一个复杂而长期的过程,需要不断探索和创新。在全球化背景下,中国载人航天工程的生态建设不仅承载着国家科技发展战略的重任,还肩负着推动全球空间科学进步、增进人类共同福祉的使命。面向未来,应着力打造中国特色空间站科学发展格局,在坚持自主创新同时,构建开放包容、互利共赢的空间科学合作网络,广泛邀请全球科学家参与空间站的科学实验与研究,共同探索宇宙奥秘;同时积极推动全球空间治理,维护外空安全与秩序,为构建外空领域人类命运共同体提供中国智慧与方案,为构建和平共处、合作共赢的生态体系贡献中国力量。

参考文献

- [1] 中国空间站天和核心舱发射成功 习近平代表党中央、国务院和中央军委致电祝贺[EB/OL]. (2021-04-29)[2024-08-15]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-04/29/content_5603771.htm#.
The successful launch of the Tianhe core module of China's Space Station was congratulated by Xi Jinping, who sent a congratulatory message on behalf of the CPC Central Committee, the State Council, and the Central Military Commission[EB/OL]. (2021-04-29)[2024-08-15]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-04/29/content_5603771.htm#.
- [2] 中国科学院与载人航天工程[EB/OL]. (2013-06-14)[2024-10-15]. https://www.cas.cn/zt/kjzt/zkyyzrht/zrhtgc/201306/t20130614_3865777.shtml.
The Chinese Academy of Sciences and the Manned Space Engineering Program[EB/OL]. (2013-06-14)[2024-10-15]. https://www.cas.cn/zt/kjzt/zkyyzrht/zrhtgc/201306/t20130614_3865777.shtml.
- [3] 傅志寰, 李伯聪. 工程生态论: 探索建构工程研究的新范式[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024(10): 4-16.
Fu Z H, Li B C. The theory of engineering ecology: Constructing a new paradigm of engineering studies[J]. Frontiers, 2024(10): 4-16.
- [4] 李伯聪, 王楠, 傅志寰. 工程生态研究: 社会与时代的呼唤[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(5): 365-377.
Li B C, Wang N, Fu Z H. On engineering ecology: A call of the society and the times[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(5):

- 365-377.
- [5] 王大洲, 范春萍. 工程生态: 内涵分析与研究进路[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(5): 378-389.
Wang D Z, Fan C P. Engineering ecology: conceptual analysis and research approach[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(5): 378-389.
 - [6] 中国载人航天工程简介[EB/OL]. [2024-10-15]. <https://www.cmse.gov.cn/gygc/gcjj/>.
Brief introduction of China's manned space[EB/OL]. [2024-10-15]. <https://www.cmse.gov.cn/gygc/gcjj/>.
 - [7] 顾逸东. 关于空间科学发展的一些思考[J]. 中国科学院院刊, 2024, 37(8): 1031-1049.
Gu Y D. Thoughts on space science development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 37(8): 1031-1049.
 - [8] 高铭, 赵光恒, 顾逸东. 我国空间站的空间科学与应用任务[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 721-7.
Gao M, Zhao G H, Gu Y D. Space science and application mission in China's space station[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 721-7.
 - [9] 中国载人航天工程办公室. 中国空间站科学研究与应用进展报告(2024)[R]. 北京: 中国载人航天工程网, 2024.
The China Manned Space Engineering Office. Progress report on scientific research and application of China Space Station (2024)[R]. Beijing: China Manned Space Engineering Network, 2024.
 - [10] 央视网. 中国空间站科学实验镜像平台建成运行[EB/OL]. (2024-11-02)[2024-12-15]. <https://tv.cctv.com/2024/11/02/VIDEu0luzxJ0Ho3Q0oEYcV1d24110.shtml>.
The CCTV Network. The mirror platform for the China Space Station has been put into operation[EB/OL]. (2024-11-02)[2024-12-15]. <https://tv.cctv.com/2024/11/02/VIDEu0luzxJ0Ho3Q0oEYcV1d24110.shtml>.
 - [11] 李伯聪, 贾玉树, 夏保华, 等. 工程哲学与伦理: 前沿对话[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16(2): 161-170.
Li B C, Jia Y S, Xia B H, et al. Engineering philosophy and ethics: Frontier dialogues[J]. Journal of Engineering Studies, 2024, 16(2): 161-170.
 - [12] 中国载人航天工程办公室. 联合国和中国同意增进航天合作[EB/OL]. (2016-06-23)[2024-12-19]. https://www.cmse.gov.cn/gjhz/201606/t20160623_23730.html.
The China Manned Space Engineering Office. The United Nations and China have agreed to enhance space cooperation[EB/OL]. (2016-06-23)[2024-12-19]. https://www.cmse.gov.cn/gjhz/201606/t20160623_23730.html.
 - [13] 李剑刚. 沃尔夫条款与中美航天合作[J]. 中国航天, 2014(2): 42-44.
Li J G. The Wolf clause and Sino-US space cooperation[J]. China Aerospace, 2014(2): 42-44.
 - [14] 新华网. 17国9个项目入选中国空间站首批科学实验[EB/OL]. (2019-06-12)[2024-12-15]. https://www.xinhuanet.com/world/2019-06/12/c_1124614930.htm.
Xinhua Net. Nine projects from 17 countries were selected as the first batch of scientific experiments on China Space Station[EB/OL]. (2019-06-12)[2024-12-15]. https://www.xinhuanet.com/world/2019-06/12/c_1124614930.htm.
 - [15] 中国载人航天工程网. 天宫一号空间应用成果丰硕 未来发展前景广阔——专访空间站工程空间应用系统副总设计师张善从[EB/OL]. (2014-09-30)[2024-12-17]. <https://www.cmse.gov.cn/zhuanti/news/show.php@itemid=4280>.
China Manned Space Engineering Network. Interview with Zhang Shancong, deputy chief designer of the space application system for the Space Station Project[EB/OL]. (2014-09-30)[2024-12-17]. <https://www.cmse.gov.cn/zhuanti/news/show.php@itemid=4280>.
 - [16] 载人航天工程数据生态平台介绍[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.msadc.cn/about>.
Introduction to the Data Ecosystem Platform for Manned Space Engineering[EB/OL]. [2024-12-17]. <https://www.msadc.cn/about>.
 - [17] 柴雅欣. 天舟八号发射告捷 "太空快递"送抵天宫[EB/OL]. (2024-11-16)[2024-12-17]. https://www.ccdi.gov.cn/yaowenn/202411/t20241116_388.html.
Chai Y X. Tianzhou-8 launched the successful "space express" delivered to the Tiangong[EB/OL]. (2024-11-16)[2024-12-17]. https://www.ccdi.gov.cn/yaowenn/202411/t20241116_388.html.

An Engineering Ecology Analysis of the Space Utilization System in China Manned Space

Li Lixian¹, Gao Ming^{2,3*}, Wang Yixuan⁴, Xu Zhuting⁵

1. School of Humanities, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Humanities and Social Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

5. Institute for History and Culture of Science & Technology, GuangXi University for Nationalities, Nanning 530006, China

Highlights

This paper discusses the application of engineering ecology theory in China's Space Station Space Utilization System, highlighting a new ecological understanding of engineering.

It summarizes ecological construction strategies throughout the system's development, illustrating the process of building a complete ecosystem from inception to maturity.

The paper emphasizes that the ecological evolution of the system is a complex, multi-dimensional process with dynamic interactions at various levels, reflecting the complexity, vitality, and innovation of the engineering ecosystem.

Graphical Abstract

space utilization

development of Space Utilization System in Manned Space Engineering

- ✦ manned spacecraft utilization system (1993—2005)
- ✦ space laboratory utilization system (2007—2019)
- ✦ space station utilization system (2010—2035)

ecological strategy

“ecological” strategy for Space Station Utilization System

- ✦ establish multi-disciplinary experiment facilities
- ✦ select & cultivate science projects
- ✦ integrate space-surface mirror experiment platform
- ✦ gather talents
- ✦ promote international cooperation; build data ecosystem

theoretical analysis

theoretical analysis of Space Station Utilization's ecological construction

- ✦ shift from control to ecological regulation
- ✦ enhance digital-intelligence integration for ecological benefits
- ✦ foster symbiotic balance through competition, cooperation
- ✦ examine engineering ecology from micro to macro perspectives

Abstract: The mission objective of China's Manned Space Engineering Space Utilization System is to leverage the application support capabilities of manned spacecraft to conduct scientific experiments and applied research, driving and leading the leapfrog development in the field of space science and applications. Since the manned space program was initiated in 199, the development philosophy of "building spacecraft for the purpose of establishing stations, and establishing stations for utilization" has been advocated. This paper reviews the development journey of the Space Utilization System through three stages: manned spacecraft, space laboratory, and space station, and summarizes six strategies for constructing an engineering ecosystem: ① Demonstrating capabilities within limited space by building a cluster of multidisciplinary experimental facilities; ② Continuously selecting and nurturing scientific projects to solidify the foundation of the ecosystem; ③ Achieving a mirror image between space and Earth to create an integrated experimental support platform; ④ Aggregating diverse talents to establish an open collaboration framework; ⑤ Adopting a global perspective to actively promote international cooperation; ⑥ Constructing a data ecosystem to facilitate open resource sharing. Subsequently, from the theoretical perspective of engineering ecology, the paper discusses the ecological construction of the Space Application System in four aspects: transitioning from "engineering control" to "engineering ecological regulation"; deepening the integration of digitalization and intelligence to enhance ecological benefits; competitive and cooperative interactions for creating a symbiotic balance; and the evolution of engineering ecology from micro, meso, and macro perspectives. The construction of the engineering ecosystem for the manned space application system aims to integrate scientific research resources, optimize management processes, and strengthen collaborative innovation, forming an efficient, open, and sustainable ecological environment. Guiding system design with an ecological mindset not only focuses on the independent performance of each module but also emphasizes their interactivity and symbiosis within the overall ecosystem, thereby maximizing resource utilization and system efficiency, and accelerating scientific discoveries and technological innovations.

Keywords: China Manned Space; Space Utilization System; engineering ecology; ecological evolution