

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600753



本刊网刊

中国空间技术发展展望

周志成¹, 蒲伟², 梁弼政¹, 朱贵伟¹, 王海南³, 高志华², 赵红军², 仲小清¹

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610297; 3. 中国航天科技体系与创新研究院, 北京 100029)

摘要:全球航天已整体迈入产业化、高频化、体系化与智能化并行发展的全新阶段,对空间技术的发展和布局提出了更高的要求。本文从空间技术发展态势出发,围绕进出太空、利用太空、探索太空 3 个维度进行梳理和总结,研判发展方向和关键趋势;立足现阶段中国航天面临的战略机遇与发展挑战,着眼航天强国中长期建设目标,从中国航天发展顶层布局开展战略思考,面向复杂异构巨型星座、高性能算力卫星、在轨服务与运维保障、具身智能航天器、新型核推进与核电源、地月资源勘探开发等重点任务方向及关键技术群的布局与攻关进行展望,以期以坚实的空间技术为基础,支撑中国航天高质量高效益建设发展。

关键词:中国空间技术;航天发展态势;空间技术发展展望;太空分域发展布局;异构星座互联、航天+智能深度融合;太空资源开发利用

中图分类号:V11

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)05-0063-10

当前,全球航天发展格局深刻变化,航天成为大国战略竞争与科技博弈的关键领域,中国航天将进入以高质量发展为主题的新征途,重大机遇与关键挑战并存。美国依靠低成本重复使用运载火箭发展“星链”等巨型低轨星座,加速抢占频轨稀缺资源,同时通过元器件禁运、排他性国际航天合作联盟、主导外层空间规则制定等多重手段,对中国航天发展形成了客观制约。中国依托顶层部署、七十年接续攻坚的航天工程技术积淀,以北斗导航系统、载人航天、探月与深空探测、民用空间基础设施等为牵引,坚守自主创新的发展道路,不断夯实硬实力,筑牢国家安全基石。针对航天高质量发展的国家战略需求,中国航天正以提升创新能力、健全产业生态、构建全球竞争优势为核心任务,加快形成高水平技术供给体系,以支撑航天强国战略。

本文系统梳理全球航天发展态势,分析进出太空、利用太空、探索太空三大主线领域发展特征,总结新时代中国航天标志性工程突破成果,辩证剖析产业发展机遇与核心短板;围绕复杂异构巨型星座、高性能算力卫星、在轨服务与运维保障、具身智能航天器、新型核推进与核电源、地月资源勘探开发等前沿战略领域提出发展思考。

1 全球空间技术发展态势

全球空间技术进入竞争日趋激烈、技术迭代提速、商业化不断深化的新阶段,已成为推动科技创新与产业变革的重要力量。近年来,航天发射成本数量级降低、商业力量深度参与、人工智能广泛应用,正深刻变革航天产业体系。进出太空、利用太空、探索太空三大领域迎来全面革新:航天运输从低频次、一次性发射转向高密度、可重复航班模式;空间应用从单星独立服务迈向体系化建设与融合运用;载人航天与深空探测则由近地轨道驻留向地月空间拓展,并进一步迈向远域资源开发。

1.1 进出太空领域

全球航天发射规模持续扩容,航天发射活动已进入高密度、高增速的发展阶段。2021 年以后,在重复使用运载火箭迭代成熟与大型星座规模化部署的双重驱动下,全球航天年度发射频次、航天器发射数量逐年攀升,航天运输常态化、规模化的趋势越发明显。2025 年,全球航天发射保持高速增长态势,全年共完成航天发射 329 次,发射航天器 4 586 个,总发射载荷质量达到 3 261 t,3 项指标同比增长 25.5%、60.0%、

收稿日期:2026-08-14 修回日期:2026-08-25 网络出版日期:2026-08-28

作者简介:周志成(1963—),男,中国工程院院士。研究方向:航天器总体设计;航天系统。E-mail:zhouzc@cae.cn

13.5%，整体航天发射活跃度创下历史新高。目前，重复使用运载火箭已成为航天运输领域的重要组成，开启了低成本、高频次航天运输的新纪元，大幅提升了人类进出空间的能力，奠定了规模化利用太空的基础^[1-2]。图 1 为近十年世界航天发射情况。

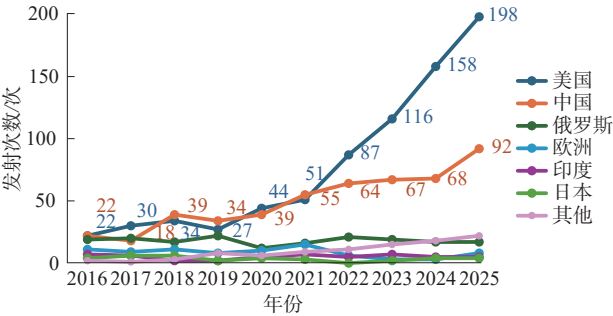


图 1 近十年世界航天发射情况

Fig. 1 Worldwide space launch statistic in the recent decade

目前，美国凭借重复使用运载技术的率先突破，实现低成本、高频次发射，进出空间能力全球领先，技术优势呈现持续扩大趋势；中国航天发射规模稳步提升，与美国并处第一梯队，但综合运载能力与美国仍有差距。欧洲、俄罗斯、印度、日本等国家发射规模较小、增长较慢，居于第二梯队。

美国作为全球航天发射的引领者，2025 年全年完成 198 次发射，同比增长 25%，共发射航天器 4 050 个，发射质量 2 818 t，各项指标均领先其他国家。凭借成熟的一子级重复使用运载技术、加速验证的完全重复使用技术，美国构筑了航天低成本高频次发射的核心优势。猎鹰九火箭已实现常态化发射，全年共发射 165 次，平均发射质量 13.3 t/次，一子级复用次数已达 30 余次，发射间隔平均仅约 2.2 d/次。同时，美国在重复使用运载领域已形成多技术路线并行推进的格局，除成熟运营的猎鹰九火箭外，蓝色起源“新格伦”火箭成功完成助推器回收试验。此外，超重-星舰完全重复使用运载系统已完成 13 次试飞迭代，正由技术验证加速迈向工程应用阶段；基于此，美国未来将依托百吨级单箭运载与快速周转能力，实现星座规模化部署，重塑全球进出空间模式。中国 2025 年完成 92 次航天发射，同比增长 35%，共发射航天器 390 个，发射质量 319 t，航天发射产业化进程持续加快。在重复使用运载领域，中国长征十号乙火箭已完成一子级回收试验，并开创了网系回收的新模式，计划于 2026 年底完成一子级复用飞行验证；朱雀三号当前也完成了一子级回收试验。

1.2 利用太空领域

全球通信、导航、遥感等空间系统已进入常态化应用阶段，在星座组网与人工智能驱动下，正向智能

化、体系化方向发展，功能、形态不断更新迭代。当前利用太空领域呈现美国领跑、欧俄稳步迭代、中国加速赶超、日印等国错位竞争的发展态势。中国坚持自主创新发展，空间基础设施建设日趋完善，高通量卫星、北斗导航系统、高分辨率对地观测系统已跻身国际先进行列。

在卫星通信方面，低轨星座加速部署组网，高轨系统加速转型升级，高低轨协同组网、融合发展成为主流导向^[3]。美国低轨卫星发展领跑全球，“星链”规模化优势显著，2026 年在轨卫星超 10 000 颗，累计用户数超 1 000 万，服务 160 多个国家/地区；“亚马逊低轨”（原“柯伊伯”）星座快速跟进布局，已累计部署近 400 颗卫星并测试服务；欧洲卫星公司合并美国国际通信卫星公司，推进建设“高中低轨”融合网络^[4-5]。中国坚持独立自主的发展路线，低轨卫星互联网星座基本系统完成组网，应用能力逐步形成^[6-7]；高轨中星、亚太系列通信卫星性能跻身国际先进行列^[8]，满足了国土及周边应用需求。未来，卫星通信将加速向宽带互联网接入^[9-10]、手机直连^[11]以及通智融合^[6]等方向拓展，迎来全新的历史性发展机遇。

在卫星导航方面，全球卫星导航领域已形成美国 GPS、中国北斗、欧盟 Galileo、俄罗斯 GLONASS 并存的多系统竞争格局。其中，GPS 与北斗的综合实力处于全球领先水平^[12]；Galileo 和 GLONASS 保持全球覆盖，但系统规模和应用生态相对有限。与此同时，日本、印度等国依托区域导航系统差异化布局，共同构建了梯队化、多元化全球竞争态势^[13-14]。此外，卫星导航正在向高低轨融合、高精度服务的综合 PNT 体系演进，以“铱星”、“星链”、中国卫星互联网为代表的低轨通导融合星座快速落地，有效补强传统中高轨导航性能。

在卫星遥感方面，全球遥感卫星呈现“星座化、智能化”发展态势，低轨遥感星座通过高频组网逐步从“周期重访”向“持续凝视”升级。美国凭借成熟低轨遥感星座占据领先优势，不断提升智能信息处理能力与遥感信息品质，使遥感服务迈入准实时、高精度阶段，并持续向多领域延伸。美国部署地面/空中动目标星座，推动装备融入战术级反时敏作战。欧洲深耕星上 AI 智能应用，Phi-sat-2 卫星搭载的 Myriad-2 视觉处理单元能够自动剔除无效图像，可减少约 90% 数据量下传，将灾害事件信息获取延迟从数小时降至分钟级。中国高分系列遥感卫星可实现亚米级分辨率的高精度立体成像，多模卫星实现目标敏捷提取，大幅提升应急响应速度，不断推动高精度遥感技术落地民生及应急救援等应用场景。

在卫星算力方面，随着星座规模化组网与人工智

能技术发展,地面算力逐步向太空延伸^[15],正在形成太空“感、传、算、用”一体化的应用体系。目前,天基算力尚处于起步阶段,各国正处于布局抢占期,都在加速能力建设与资源部署。美国瞄准太空智算积极布局,采用集中式空间站算力部署与分布式卫星在轨运算并行的发展路径:一方面,轨道云公司、公理太空公司将数据中心原型设备运至国际空间站开展高密度算力部署试验;另一方面星云公司利用英伟达H100 GPU芯片及谷歌“双子座”(Gemini)大模型开展数据中心级GPU在轨运算及分布式训练大语言模型试验。未来,星链计划将百万颗卫星打造成分布式太空算力集群,推动天基算力走向规模化应用。中国国内中国科学院、航天科技集团、之江实验室等科研院所持续推进天基算力的发展,并通过相关计划积极探索天基算力发展途径。

在在轨服务方面,世界主要航天国家正推动在轨装备向可维护、可升级、可扩展、智能化方向发展。美国着力构建自主感知、精细操作与集群协同智能操控体系,通过OSAM、SpiderFab等计划验证机器人自主装配大孔径天线和桁架等大型结构;诺格公司先后发射任务扩展飞行器MEV-1、MEV-2和任务机器人飞行器MRV,实现对地球同步轨道商用卫星的自主对接、接管与部件更换组装。在中国,空间站机械臂成功实现大吨位舱段转位与辅助建造,实践二十一号卫星完成空间碎片减缓技术试验验证。为服务国家重大战略,四川大学于2011年高标准成立了空天科学与工程学院(简称空天学院),2020年,空天学院与航天五院总体设计部共建机器人卫星研究所,并首次提出机器人卫星概念:一种具有感知、决策与执行等典型机器人特征的空间应用卫星,可自由飞行或浮游,抵近目标执行检查及清除碎片,具备小型化、敏捷机动、先进探测、智能决策与灵巧自主作业等特征。截至目前,空天学院在机器人卫星领域取得了系列进展,先后获批教育部和四川省重点实验室,空间精密传动、多脉冲固体推进、耐空间环境柔性传感、仿生黏附操控等机器人卫星关键技术在中国重要工程任务中得以应用。未来,将进一步突破以机器人卫星等为代表的具身智能航天器核心技术,推动在轨服务、碎片清理、空间安全等向更高水平发展。

1.3 探索太空领域

全球主要航天大国正持续加大太空科学探索投入,空间站科学研究、月球与火星探测、深空观测等任务密集展开,探索边界从近地空间和地月空间逐步向深空拓展。国际空间站将于2030年退役并由商业空间站接力,天宫空间站持续常态化运行并规划扩容升级。美国以阿尔忒弥斯计划为核心推进载人登月与永

久月球前哨站建设、火星勘察等任务,中国亦稳步推进载人登月工程与深空探测工程,中美整体处于并行发展阶段。

在近地空间,国际空间站自2000年起连续运行超25年,已接待来自110余国5 000余名研究人员,累计完成4 000余项微重力实验,是当前全球合作规模最大、成果最丰富的近地载人空间平台。中国已实现载人航天“三步走”战略目标,建成“T”字基本构型天宫空间站并转入常态化在轨运营。目前,天宫空间站已进入在轨应用与发展阶段,空间科学试验取得阶段性成果:截至2026年6月,中国空间站已累计开展267项科学应用项目,产出科研数据超150 TB,充分展现了平台规模化应用潜力。在国际空间站2030年即将退役的背景下,中国空间站具备独特优势,正从建设期转向深度应用,持续提升科研产出并拓展国际合作。

在月球空间,为解决长期太空探索面临的能源短缺等关键问题,美国“阿尔忒弥斯”计划分阶段开展技术验证:2027年通过阿尔忒弥斯3号验证近地轨道关键技术,保证后续登月任务安全可靠;2028年前依托阿尔忒弥斯4号重返月球,2028年内通过阿尔忒弥斯5号登月,后续规划每年至少开展一次月表着陆,逐步建立月面长期驻留设施。中国探月工程按照“绕、落、回”三步走规划有序实施:“嫦娥三号”完成中国首次月球软着陆与月面巡视勘察;“嫦娥四号”实现人类首次月球背面软着陆与巡视探测,系统性提升定点着陆探测、地月中继通信、远距离测控等能力;“嫦娥五号”完成1 731 g月球样品的无人采样返回任务,标志中国已具备地外天体采样回传能力;“嫦娥六号”实现全球首次月球背面无人采样返回,共取回1 935.3 g月壤样本,推动中国月球科研迈入月背实物分析的新阶段。

在深空探索领域,美国以载人登火为远景目标进行技术积累,但尚无明确任务节点。此外,各航天大国布局太阳系远端探测,推进“灵神星”金属小行星探测、“欧罗巴快船”木卫二专项探测任务。中国深空探测通过“天问一号”实现火星“绕、着、巡”,验证了地外行星软着陆、远距离测控通信等关键技术。“天问二号”于2025年5月29日成功发射,填补了中国在小行星探测领域的空白;计划于2027年完成首次小行星伴飞探测采样与主带彗星探测。通过攻克弱力天体表面采样、高精度相对自主导航与控制、多模式长寿命高可靠电推进等关键技术,有望探明太阳系早期信息以及水与有机物质存在情况,为太阳系起源演化与生命起源研究提供重要数据。

2 中国航天高质量发展战略思考

2026年,中国航天事业迎来七十周年。七十载风雨兼程,中国航天人坚持自力更生、自主创新,航天科技水平实现跨越式发展,取得一系列标志性成果。“十五五”新征程开启,航天强国建设已进入高质量发展的关键时期^[16],在新型举国体制的优势保障下,中国航天人将沿着自主创新之路,向着实现航天强国的宏伟目标坚定前行。

2.1 太空分域体系化布局思考

太空空间是人类未来生存发展的关键领域。随着美国加速太空军事化布局、全域抢占轨频资源并构建天基作战体系,大国外层空间战略竞争愈演愈烈,从近地空间到地月空间乃至深空,都充斥着资源争夺、技术竞争与规则博弈。着眼当下,高轨聚焦轨位资源争夺以及连续覆盖与远域中继能力建设;低轨已成为商业航天的发展重心,重点建设全球感知与高速通信网络;面向新域,超低轨成为增强通导遥能力的潜在方向,中轨将成为未来多轨道混合星座的中枢纽带,地月空间将成为大国航天科技竞争的前沿方向,深空承载人类探索宇宙的终极梦想。各空间域基于轨道环境特征与应用方向呈现出不同的发展态势。如何分域统筹太空空间领域技术创新、合理分配建设资源、形成有力支撑能力并掌握发展主动权,已成为亟待解决的关键问题。

1)超低轨:是低时延通信、超高分辨率遥感与快速响应的前沿,需形成手机直连通信、重点目标持续跟踪与近实时应急通信的能力。超低轨轨道高度100~350 km,作为最贴近地表的卫星近地轨道,空间干净、辐射微弱、传输时延极低,适合发展超低时延通信、超高分辨率遥感、近地轨道空间态势感知;但是与更高的轨道相比,大气阻力强、轨道衰减快。超低轨作为尚未充分开发的新兴领域,相关技术历经攻关,已处于规模化应用的转进期,是当前空间基础设施重点布局方向。

2)低轨:是互联网数字底座的组成核心,需形成大规模星座组网、通导感算一体化与数据实时处理的天基服务能力。低轨轨道高度350~2 000 km,距离地表近、轨道覆盖范围广、组网灵活度高,适合遥感、通信等卫星规模化组网应用;但低轨轨道空间开发充分,轨位与频谱资源稀缺,在轨航天器碰撞风险高。面对星座规模化组网竞争加剧的态势,中国需加快低轨巨型星座建设,以构建通导感算融合、全球覆盖的低轨信息基础设施为目标,重点解决大型星座规划与调度、跨域星间组网高速通信、大容量数据高效处理等难题。

3)中轨:是导航定位授时核心与中继管控的战略前沿,需形成高精度导航增强与跨轨道协同联动的支撑能力。中轨轨道高度2 000~36 000 km,高度适中,轨道覆盖均衡,轨道点位战略价值高;但存量资源有限,受高能粒子辐射影响大。中轨作为高、低轨间的过渡域,各航天大国主要在此发展导航定位等应用,并正向全天候监视、跨洋通信中继、跨星座数据转发等方向拓展。针对中轨域功能单一、支撑作用不强的现状,中国可以构建高低贯通的中轨骨干管控体系为目标,重点破解异构星座跨域协同组网、中继管控网络弹性重构、高动态拓扑资源规划等难题。

4)高轨:是保障全球通信的顶层核心,需抢占稀缺轨位资源,形成广域信息传输、远域测控中继的能力。高轨轨道高度在36 000 km附近,具有大时空连续覆盖优势;但距离远使空间分辨率受限、通信时延长,且频轨资源有限、竞争激烈,属于不可再生战略空间资源。针对高轨轨位稀缺、战略价值突出的特点,各航天大国积极发展“以天统地”保底通信、固定区域遥感监视。面对轨道安全风险攀升、深空测控中继压力大的形势,中国应以构建安全可靠的高轨保底支撑为目标,重点破解空间碎片防控、深空超长时延测控等难题。

5)地月空间:是迈向深空探测的枢纽,需形成地月常态化往返、月球常态化驻留、地月高质量通信导航服务的能力。地月空间脱离近地轨道圈层、范围广袤,适合构建地月长期驻留基础设施^[17],已逐渐成为大国竞争新高地。面对地月空间开发竞争加剧的态势,中国应以构建可往返、可驻留、可开发的地月空间设施为目标,重点破解大范围空间机动运输、月表极端环境长期驻留、月球资源原位利用等难题。

6)深空空间:是探索宇宙起源与资源开发的前沿,需形成行星际常态化探索的深空开拓能力。深空空间距离地球极遥远、无法地面实时操控,具有科学探索、资源开采的巨大潜力,但需应对高辐射、极端温差、微陨石威胁。面对深空探测保障难度大、前沿科学探索能力有限的态势,中国需加强深空测控通信能力,重点破解深空远距离通信、智能导航与自主任务规划、核动力推进与能源系统等难题。

2.2 航天高质量发展重点领域

结合“地面基底-超低轨-低轨-中轨-高轨-地月空间-深空”全域7层架构,紧扣“十五五”规划“完善民用空间基础设施,统筹建设卫星通信、导航、遥感系统,加快低轨卫星互联网组网、构建空天地一体、通导感算融合的综合服务体系”核心部署^[16],对标航

天强国“科学认知太空、自由进出太空、高效利用太空、有效治理太空”4项核心能力^[12],形成分层突破、跨域协同、全域组网、远近衔接的总体发展策略。聚焦航天强国建设目标,面对各航天大国日趋白热化的空间博弈,需结合各空间域特征与定位,推进天基网络融合、太空智能计算、在轨服务运维与空间探测开发。

2.2.1 天基网络融合

通信、导航、遥感等各类星座发展相对独立,需顶层统筹规划通信、导航、遥感、计算星座建设、加快高中低轨系统异构互联、实现天基系统间信息高效流通与融合,按照标准化、规范化要求组建天基“一张网”,构建空间基础设施体系。通过星间链路与星地链路将高、中、低、超低轨等不同空间域的异构星座联通,打通通信、导航、遥感等各类数据壁垒,形成覆盖全域、数据通联的信息网络,并依托计算星座进行智能处理,实现需求即时响应。未来应以构建高中低轨搭配、超低轨补隙的全域联通天基网络为目标,重点推进异构星座协同组网与体系智能运行,推动多空间域一体化网络建设。

2.2.2 太空智能计算

通信、导航、遥感等各类卫星数据量呈指数级增长,传统地面处理模式面临数据回传带宽受限、处理时延较高等瓶颈,需统筹天基智能计算能力建设、加快在轨算力部署,构建覆盖多轨道的智能计算体系,实现海量数据在轨实时处理。通过在高、中、低轨等不同轨道节点部署算力资源,依托AI模型实现数据智能处理与协同计算,支撑海量数据的即时解析与任务智能决策,提升卫星的智能服务能力。目前,美国已率先布局太空数据中心、AI计算集群、太空算力芯片等智能计算基础条件,正在加快关键技术攻关与在轨验证;中国已实现算力上天、模型上天^[15],正处于起步试验阶段。未来应以构建“感、传、算、用”一体化天基智能计算体系为目标,重点推进大功率平台、高效率散热、高性能算力芯片等核心技术攻关和能力布局,推动天基系统在轨自主运行。

2.2.3 在轨服务与运维保障

传统航天装备采用“出厂固化硬件、在轨不可升级”的静态应用模式,难以适配大型空间设施建造、高价值航天器延寿升级、深空资源规模开发等新型任务需求,需推进在轨服务运维体系建设,形成覆盖在轨组装、在轨维护、延寿升级、退役离轨的全生命周期在轨保障能力。未来应以构建体系完备的在轨服务运维能力为目标,重点推进在轨维修、燃料加注、模块更换等核心技术验证,推动航天装备从一次

性使用向可维护、可升级、可扩展的高效利用模式转变。

2.2.4 航天器智能化发展

随着在轨航天器数量激增以及空间任务向在轨服务、碎片清除等复杂场景延伸,传统航天器以预设指令运行为主,面对大规模星座管控、在轨服务与空间安全等复杂任务时,自主感知、决策与执行能力不足,亟需推动航天器从“地面指挥、星上执行”向具备自主感知、自主决策与自主作业能力的智能化方向跨越。目前,美国已在航天器自主控制、在轨智能决策等领域加快布局验证;中国已开展星上自主任务规划试验,以机器人卫星等为代表的具身智能航天器尚处起步阶段。未来应以构建“感知-认知-决策-作业”一体化智能航天器体系为目标,分阶段实现从单星自主运行到大规模空间碎片智能清除等体系化能力,为航天器智能化升级与空间资产高效利用提供支撑。

2.2.5 空间探测开发

传统以单次任务为主导的空间探测模式已难以满足地月空间开发、深空资源利用、行星际探测等持续性任务需求,需统筹推进空间探测与基础设施建设,加快形成地月空间运输、深空通信导航、地外资源原位利用等能力。当前,中国以探月工程、国际月球科研站建设以及天问系列深空探测为主线,稳步推进工程实施与技术迭代验证。未来应以构建地月空间常态化运输与长期驻留保障体系为目标,重点推进载人登月、月球科研站建设、火星采样返回等任务,推动空间探测由科学探索向长期驻留与资源开发利用拓展。

3 中国空间技术未来展望

世界航天正在加速向规模化、体系化、产业化方向发展,各国围绕新空域、新形态、新业务的争夺愈发激烈。中国航天立足航天强国建设总体目标,着眼新兴支柱产业迫切需求,既要加快推进产业化进程和商业航天发展,又要提前布局新域新质方向。面向未来空间基础设施建设与空间资源开发需求,需聚焦复杂异构巨型星座、高性能算力卫星、在轨服务与运维保障、具身智能航天器、新型核推进与核电源、地月资源勘探开发等关键方向,体系化布局核心技术,为争夺未来太空竞争主导权、航天强国高质量发展提供坚实支撑。

3.1 复杂异构巨型星座

面向天基泛在信息网络的发展需求,空间系统正由单星独立运行迈向大规模网络化协同。传统卫星系统以单一功能或小规模同类星座为主,通信、导

航、遥感等系统相互独立且高度依赖地面测控,难以满足未来多功能协同、资源跨域统筹以及弹性动态组网的复杂需求^[7,18]。随着低轨互联网星座和太空算力星座建设的加速推进,未来空间网络将由数千至数万颗不同轨道、不同功能、不同资源卫星构成复杂异构巨型星座^[19-20],这对跨轨互联、网络协同与智能管理等能力提出了更高的要求,需从体系架构和运行机制上实现系统性转变。为此,需要重点突破以下 3 项关键能力:一是自主运行与智能管控,实现卫星自主健康管理;二是弹性组网与跨域互联,实现多轨协同组网与信息传输;三是任务协同与智能路由,保障复杂任务多星协同规划。围绕上述能力发展需求,按照“技术验证-网络融合-全域协同”有序推进:近期突破高低轨异构网络适配、通导遥算星座业务融合技术,实现层内异构星座间网络联通与业务协同;中期突破跨星座动态组网、多源数据深度融合处理技术,实现天基星座网络的异构融合、自主协同运行;远期建成跨域异构网络融合体系,实现业务按需适配、天基无感服务。

3.2 高性能算力卫星

面向天基网络智能化应用的发展需求,空间系统正由传统的“数据采集-回传地面处理”向“在轨感知、在轨计算、在轨决策”的模式演进。传统卫星受供电、热控及计算能力制约,大量原始数据仍需回传地面处理^[21],不仅占用稀缺的星地测控资源,也难以满足星载人工智能对功耗、散热及算力的要求。为破解这一瓶颈,需要将智能算力部署至空间端,提升卫星计算能力,为卫星自主运行、星座智能协同提供支撑。为此,需要重点突破以下 3 项关键能力:一是大功率能源平台,实现持续稳定的能量供给;二是高效热管理,保障高热流快速散热与热平衡控制^[22];三是抗辐射高性能芯片,实现高算力与复杂空间环境可靠运行。围绕上述能力发展需求,按照“单星验证-平台升级-系统构建”路径:近期突破单星百 TOPS 级算力、轻量化太阳翼供电、高温辐射散热技术,形成单星智能管理能力;中期突破百千瓦级低轨能源平台和标准化高温热控系统,实现抗辐射高性能芯片规模应用,具备复杂环境星群分布式协同与自主运行能力;远期形成覆盖全球的天基数据中心网络,供电-散热-算力实现全智能闭环调度,天基系统具备智能生存能力。

3.3 在轨服务与运维保障

面向长期空间活动与空间资产高效利用的需求,空间系统正由“地面定型、在轨固化”的单次使用模式向“可维护、可升级、可扩展”的持续应用模式转变。这

一发展趋势对在轨服务能力与运维保障提出了更高要求。然而,受运载能力限制、运载外包约束、在轨维修手段不足等条件制约,现有技术难以满足未来大型空间设施建设、高价值航天器延寿以及地外规模开发等复杂任务需求^[23-24]。为此,需要重点突破以下 3 项关键能力:一是燃料加注与故障修复,实现航天器自主延寿与维修;二是在轨制造与空间建造,实现空间设施组件建造、大型机构组装;三是自主作业与协同操控,实现多机器人协同作业与精细操控。围绕上述能力发展需求,按照“技术突破-体系构建-智能服务”有序推进:近期突破在轨燃料加注、精密部件替换等关键技术,形成航天器在轨维护与延寿的基本能力;中期突破复杂环境增材制造、多机器人协同作业、空间结构在轨组装等技术,实现空间设施模块化建造;远期建成空间自主运维体系,实现智能化集群运维服务。

3.4 具身智能航天器

面向未来大规模空间碎片清除以及空间安全等需求^[25],空间系统正由单一功能卫星向具备在轨操作能力的具身智能航天器演进^[26]。传统卫星以通信、导航、遥感等功能为主,在快速抵近、智能感知与决策、自主灵巧作业等方面能力较弱,无法很好满足在轨服务与空间安全的要求。为加速以机器人卫星等为代表的具身智能航天器发展,未来需要重点突破以下 3 项关键能力:一是快响应轻质大推力推进,实现快速抵近与敏捷机动;二是先进功能材料与精准感知,实现空间环境多模态感知;三是具身智能平台与新型作业机构,实现空间智能灵巧操控。围绕上述能力发展需求,按照“技术突破-在轨验证-体系建用”有序推进,发展路线如下:近期突破小型大推力推进、多自由度灵巧操作机构与多模态自主感知等核心技术,研制机器人卫星等样机,实现在轨操作验证;中期具备非合作目标自主操控能力;远期建成覆盖不同轨道与任务场景的具身智能航天器体系,具备大规模空间碎片智能清除等体系化能力。

3.5 新型核推进与核电源

面向空间长期探索、地外长期驻留的发展需求,空间能源与推进系统正由传统太阳能供电向高能量密度的新型能源体系演进^[27-28]。传统航天器电源以太阳翼搭配蓄电池的供能模式为主,能源获取依赖光照,存在能量密度低、供电受日照条件影响、难以支撑高功率持续运行等问题,难以适配月球极区探测、深空长期驻留、大规模算力运算、高功率载荷持续工作的能源需求。随着月球科研站建设、深空探测的推进,未来空间任务将由短周期探测转型为长周期运行,这

对航天器的稳定供能、持续推进和极端环境适应能力提出了更高要求,需将核电源、核推进等新型技术引入空间能源与推进领域,推动能源供给从“靠天吃饭”向“自主稳供”转变,为空间长期探测与地外长期驻留提供持续稳定的能源与动力保障。为此,需要重点突破以下3项关键能力:一是高能量密度供能,通过小型化核反应堆与高效热电转换,实现长期稳定供能;二是高效动力保障,实现高比冲、长寿命推进;三是推能一体化,实现能源供给与动力推进深度融合的空间能源平台。围绕上述能力发展需求,按照“百瓦验证—千瓦应用—推能一体”演进路径:近期突破小型化核反应堆、高可靠热电转换技术,实现十千瓦级星载核电源工程研制,初步具备在轨应用基础条件;中期实现数十千瓦级星载核电源工程化应用,具备月球极夜等极端环境持续供电能力;远期实现核动力推进与核电源供能的深度融合及在轨应用,建成推能一体的空间能源平台。

3.6 地月资源勘探开发

面向地月空间开发利用的战略需求,空间探测活动正由短期探索拓展至设施建设、长期驻留与资源开发的新阶段^[29-30]。这一发展趋势对地月空间设施部署、空间运输保障、资源原位利用能力提出了更高要求,需构建覆盖探测、运输、保障、开发全链条的地月空间开发体系。然而,现有技术基础薄弱,难以有效支撑地月空间常态化、规模化活动的需求。为此,需要重点突破以下3项关键能力:一是地月空间态势感知与风险预警,实现地月空间目标监测跟踪与空间风险预判;二是地月通信导航与运输保障,实现无盲区通信导航网络与常态化物资投送;三是月球资源开发与长期驻留,实现月壤资源原位利用与长期生命维持。围绕上述能力发展需求,按照“短时探测—长期驻留—深化应用”有序推进:近期突破地月中继星座组网、月面着陆返回技术,实现地月稳定通导保障与登月安全起降;中期突破重复使用地月转移平台、长期驻留生命保障等技术,具备地月常态化物资投送能力;远期建成覆盖地月全域的空间开发体系,形成资源勘查利用、快速运输保障及长期驻留生存的能力。

4 结束语

历经七十载接续攻关与建设发展,中国航天事业进行长期技术积淀,现阶段已进入跨越式升级的关键窗口期,发展重心由单点技术突破转向空间资源规模化开发、航天产业生态培育、外层空间治理规则塑造多线并行的全新阶段。本文系统研判全球航天产业整

体发展态势,全面梳理新时代中国航天标志性成果,辩证剖析全球航天产业格局重塑背景下中国航天发展面临的战略机遇与深层次挑战。根据党的二十大对航天强国建设的顶层部署,本文围绕复杂异构巨型星座、高性能算力卫星、在轨服务与运维保障、具身智能航天器、新型核推进与核电源、地月资源勘探开发等方向进行展望,以期为航天强国高质量发展提供支撑。

参考文献:

- [1] Bao Weimin. A review of reusable launch vehicle technology development[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(23): 1-26. [包为民. 可重复使用运载火箭技术发展综述[J]. 航空学报, 2023, 44(23): 1-26.]
- [2] Bao Weimin, Wang Xiaowei. Prospect of airline-flight-mode aerospace transportation system[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(3): 1-6. [包为民, 汪小卫. 航班化航天运输系统发展展望[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(3): 1-6.]
- [3] Zhou Zhicheng, Li Diqing, Tan Xiaomin, et al. Technological innovation and future development of China's communication satellites[J]. Chinese Space Science and Technology, 2026, 46(3): 34-46. [周志成, 李砥擎, 谭小敏, 等. 中国通信卫星技术创新及未来发展[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2026, 46(3): 34-46.]
- [4] Sheng M, Zhou D, Ji S, et al. Satellite communications in the New Space era: A survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(1): 55-92.
- [5] Wu Shufan, Wang Wei, Wen Jifan, et al. Review on development of LEO Internet constellation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 1-11. [吴树范, 王伟, 温济帆, 等. 低轨互联网星座发展研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 1-11.]
- [6] Dou Chenglong, Wu Yuan, Qian Liping, et al. Communication, sensing and computing integration empowered LEO satellite constellation networks: Architecture and key technologies[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(5): 9-15. [窦成龙, 吴远, 钱丽萍, 等. 通感算融合赋能的低轨卫星星座网络架构与关键技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(5): 9-15.]
- [7] Li Feng, Yu Hang, Ding Rui, et al. Development strategy of space Internet constellation system in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 137-144. [李峰, 禹航, 丁睿, 等. 我国空间互联网星座系统发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 137-144.]
- [8] Wang Min, Wei Qiang, Hou Weiguo, et al. System design and technological innovation of APSTAR-6E satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2025, 34(1): 14-19. [王敏, 魏强, 侯卫国, 等. 亚太6E卫星总体设计及技术创新[J]. 航天器工程, 2025, 34(1): 14-19.]

- [9] Chen Dong,Zhong Xiaoqing,Deng Heng,et al.Development trend and suggestions of broadband satellite communication networks[J]. Science and Technology Foresight,2022,1(1): 86–93.[陈东,仲小清,邓恒,等. 宽带卫星通信网络技术发展态势与发展建议[J]. 前瞻科技,2022,1(1):86–93.]
- [10] Chen Rui,Long Wenxuan,Wang Bingqian,et al.Multibeam high throughput satellite:Hardware foundation,resource allocation,and precoding[J].IEEE Communications Surveys & Tutorials,2026,28:5379–5415.
- [11] He Yuanzhi,Xiao Yongwei,Zhang Shijie,et al.A novel pattern for global ubiquitous interconnection:Key technologies and challenges of direct-to-smartphone[J].Journal of Electronics & Information Technology,2024,46(5):1591–1603.[何元智,肖永伟,张世杰,等. 全球泛在连接新模式:手机直连卫星关键技术及挑战[J]. 电子与信息学报,2024,46(5):1591–1603.]
- [12] 中华人民共和国国务院新闻办公室.2021 中国的航天[R]. 北京,2022.
- [13] Yang Changfeng,Yang Jun,Yang Junlin,et al.The international development strategy of the large-scale application of BeiDou navigation satellite system[J].Strategic Study of CAE,2023,25(2):1–12.[杨长风,杨军,杨君琳,等. 北斗卫星导航系统规模应用国际化发展战略研究[J]. 中国工程科学,2023,25(2):1–12.]
- [14] 中华人民共和国国务院新闻办公室.新时代的中国北斗[M]. 北京:人民出版社,2022.
- [15] Chen Yan,Song Wenbin,Zhang Ping.Seizing strategic high ground of space computing power:Global competition landscape and China's path[J].Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2026,41(5):1028–1039.[陈岩,宋文彬,张平. 抢占太空算力战略制高点:全球竞争态势与中国路径[J]. 中国科学院院刊,2026,41(5):1028–1039.]
- [16] 全国人民代表大会.中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要[R]. 北京:人民出版社,2026.
- [17] Bao Weimin,Wang Xiaowei.Some thoughts about cislunar exploration and exploitation[J].Journal of Astronautics,2022,43(6):705–712.[包为民,汪小卫. 地月空间探索与开发的思考[J]. 宇航学报,2022,43(6):705–712.]
- [18] Chen Shanzhi,Sun Shaohui,Kang Shaoli,et al.Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J].Science in China (Information Sciences),2024,54(5):1177–1214.[陈山枝,孙韶辉,康绍莉,等. 6G 星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学(信息科学),2024,54(5):1177–1214.]
- [19] Zhou Ying,Kang Dingwen,Lou Danian,et al.A survey on flexible payload techniques of communication satellites[J].Space Electronic Technology,2023,20(3):29–38.[周颖,康丁文,楼大年,等. 通信卫星灵活载荷技术综述[J].空间电子
- 子技术,2023,20(3):29–38.]
- [20] Xia Fangyuan,Wang Bo,Zhang Guoting,et al.Recent development and prospective of inter-satellite laser links terminal technology[J].Optical Technique,2023,49(2):175–183.[夏方园,汪勃,张国亭,等. 激光星间链路终端技术发展与展望[J]. 光学技术,2023,49(2):175–183.]
- [21] Peng Mugen,Xu Wenjia,Sun Yaohua,et al.Low earth orbit computing constellation:Deep integration of communication,sensing,computing and intelligence[J].Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications,2026,49(3):47–60.[彭木根,许文嘉,孙耀华,等. 低轨算力星座:通信感知计算智能深度融合[J]. 北京邮电大学学报,2026,49(3):47–60.]
- [22] Li Jin,Zhao Qiwei,Zheng Hongyang,et al.Design method and application research of deployable heat radiator for spacecraft[J].Journal of Astronautics,2024,45(10):1552–1559.[李进,赵啟伟,郑红阳,等. 航天器可展开式热辐射器的设计方法与应用研究[J]. 宇航学报,2024,45(10):1552–1559.]
- [23] Yu Dengyun,Liu Yuqiang,Wang Dianjun,et al.Development and prospects of on-orbit maintenance and repair technologies in space[J].Journal of Astronautics,2025,46(8):1483–1500.[于登云,刘育强,王典军,等. 航天器在轨维修维护技术发展现状与展望[J]. 宇航学报,2025,46(8):1483–1500.]
- [24] Zheng Yang,Zhao Cenyao,Xiong Ruizhe,et al.Research status and prospects of in-space additive manufacturing[J].Journal of Mechanical Engineering,2025,61(23):217–239.[郑洋,赵岑尧,熊瑞泽,等. 空间增材制造技术研究现状与展望[J]. 机械工程学报,2025,61(23):217–239.]
- [25] Yu Dengyun,Du Hui,Bai Fanlu.Space environmental governance:Current status and future development[J].Journal of Astronautics,2026,47(5):1103–1114.[于登云,杜辉,白梵露. 空间环境治理现状与展望[J]. 宇航学报,2026,47(5):1103–1114.]
- [26] Yu Dengyun,Wang Luyuan,Zhang Yuanyuan,et al.AI-enabled spacecraft applications:Current research and future prospects[J].Science in China (Information Sciences),2025,55(10):2524–2541.[于登云,汪路元,张园园,等. 人工智能赋能航天器应用研究现状与展望[J]. 中国科学(信息科学),2025,55(10):2524–2541.]
- [27] Hou Xiao,Li Yong,Wu Zhiwen,et al.Development of space propulsion technologies in China:Analysis and suggestions[J].Strategic Study of CAE,2024,26(3):217–225.[侯晓,李永,武志文,等. 我国空间推进技术领域发展思考与建议[J]. 中国工程科学,2024,26(3):217–225.]
- [28] Liu Yuyang,Zhang Qiyue,Fan Wanling,et al.Research progress and key technology analysis of nuclear propulsion spacecraft[J].Aerospace China,2025(5):20–32.[刘宇阳,张琦

玥,范琬铃,等. 核电推进航天器研究进展及关键技术分析[J]. 中国航天,2025(5):20–32.]

[29] Yan Yisu,Guo Jifeng.Progress of lunar *in-situ* resource utilization system[J].Journal of Astronautics,2024,45(8):1155–1171.[严一粟,郭继峰. 月球原位资源开发体系研究进展[J]. 宇航学报,2024,45(8):1155–1171.]

[30] He Boyong,Wang Chong,Li Yonghua.Status and prospect of extending space situation awareness capability to cislunar space[J]. Journal of Space Engineering University, 2026,3(3):55–61.[贺波勇,王冲,李永华. 态势感知能力向地月空间拓展的现状与展望[J].航天工程大学学报, 2026,3(3):55–61.]

【校友简介】



周志成,中国工程院院士、卫星总体技术专家、航天五院总工程师、卫星系统总设计师。长期工作在卫星研制一线,主持研制成功十余颗应用卫星,历任东方红四号、东方红五号卫星平台总设计师,是中国通信卫星进入国际先进行列并打入国际市场的开拓者之一。获得国家科技进步奖一等奖 2 项、三等奖 1 项、国家技术发明二等奖 1 项,获“何梁何利基金”奖。

周志成,中国工程院院士、卫星总体技术专家、航天五院总工程师、卫星系统总设计师。长期工作在卫星研制一线,主持研制成功十余颗应用卫星,历任东方红四号、东方红五号卫星平台总设计师,是中国通信卫星进入国际先进行列并打入国际市场的开拓者之一。获得国家科技进步奖一等奖 2 项、三等奖 1 项、国家技术发明二等奖 1 项,获“何梁何利基金”奖。

Prospects for China’s Space Technology Development
ZHOU Zhicheng¹, PU Wei², LIANG Bizheng¹, ZHU Guiwei¹, WANG Hainan³, GAO Zhihua²,
ZHAO Hongjun², ZHONG Xiaoqing¹

(1.China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
2.School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610297, China;
3.China Academy of Aerospace Science and Innovation, Beijing 100029, China)

Abstract:

Significance Space has become a decisive arena for major power strategic competition and technological advancement. The United States, leveraging low-cost reusable launch vehicles, is rapidly deploying mega-constellations such as Starlink, increasing competition for scarce orbital and spectrum resources. It has also imposed restrictions on the export of space-related components, established selective international cooperation frameworks, and played a leading role in shaping outer space governance rules. These developments present challenges to China’s space development. In response, China has pursued a path of independent innovation. Its space program is anchored by the BeiDou Navigation Satellite System, crewed spaceflight, lunar and deep-space exploration, and civil space infrastructure. These efforts continue to strengthen China’s technological capabilities and support national security. To meet the strategic demands of high-quality development of the aerospace sector, China is prioritizing the enhancement of innovation capabilities, consolidation of the industrial ecosystem, and cultivation of global competitive advantages. This paper systematically reviews global trends in space technology across three pillars: access to space, utilization of space, and exploration of space. It summarizes China’s landmark achievements, critically examines key industrial bottlenecks, and proposes strategic pathways for frontier areas, including heterogeneous mega-constellations, high-performance computing satellites, on-orbit servicing, embodied-intelligence spacecraft, nuclear propulsion and power systems, and cislunar resource development.

Progress Global space technology has entered a new stage characterized by intensifying competition, accelerating technological iteration, and deepening commercialization. In recent years, launch costs have decreased substantially, commercial actors have become increasingly involved, and artificial intelligence has been widely adopted, profoundly reshaping the space industrial system. In the domain of access to space, space transportation is transitioning from low-frequency expendable launches toward high-frequency, reusable, and airline-like operations. The United States leads in reusable launch technology, while China has achieved a comparable launch frequency but continues to lag in overall launch capacity. In the domain of space utilization, space applications are evolving from standalone, single-satellite services toward systematic constellation development and integrated deployment. In the domain of space exploration, crewed spaceflight and deep-space exploration are expanding from habitation and operations in low Earth orbit toward cislunar space and, ultimately, the development and utilization of distant resources. These global trends provide benchmarks and impetus for China’s strategic planning.

Conclusions and Prospects To strengthen its strategic position in the evolving space environment, China should adopt a systematic, domain-specific development strategy spanning the full spectrum from very low Earth orbit to deep space. This framework encompasses six major orbital domains, each with distinct strategic roles and core capability requirements.

In very low Earth orbit, the focus is on ultra-low-latency communications, ultra-high-resolution remote sensing, and persistent surveillance, leveraging its relatively clean space environment while addressing atmospheric drag and rapid orbital decay. In low Earth orbit, the priority is large-scale constellation deployment integrating communications, navigation, remote sensing, and computing services, while managing spectrum constraints and collision risks. In medium Earth orbit, enhanced positioning, navigation, and timing and cross-orbit relay functions are essential, requiring a backbone system that bridges LEO and GEO operations. In geostationary orbit, the efficient use of scarce orbital slots and the provision of wide-area information transmission and deep-space telemetry are critical, alongside challenges associated with orbital debris and communication latency. In cislunar space, the vision includes routine round-trip transportation, sustained habitation, and high-quality communications and navigation services, making this region an emerging frontier of space development. In deep space, sustained planetary exploration capabilities are required, including autonomous navigation, long-distance communications, and

nuclear power and propulsion systems.

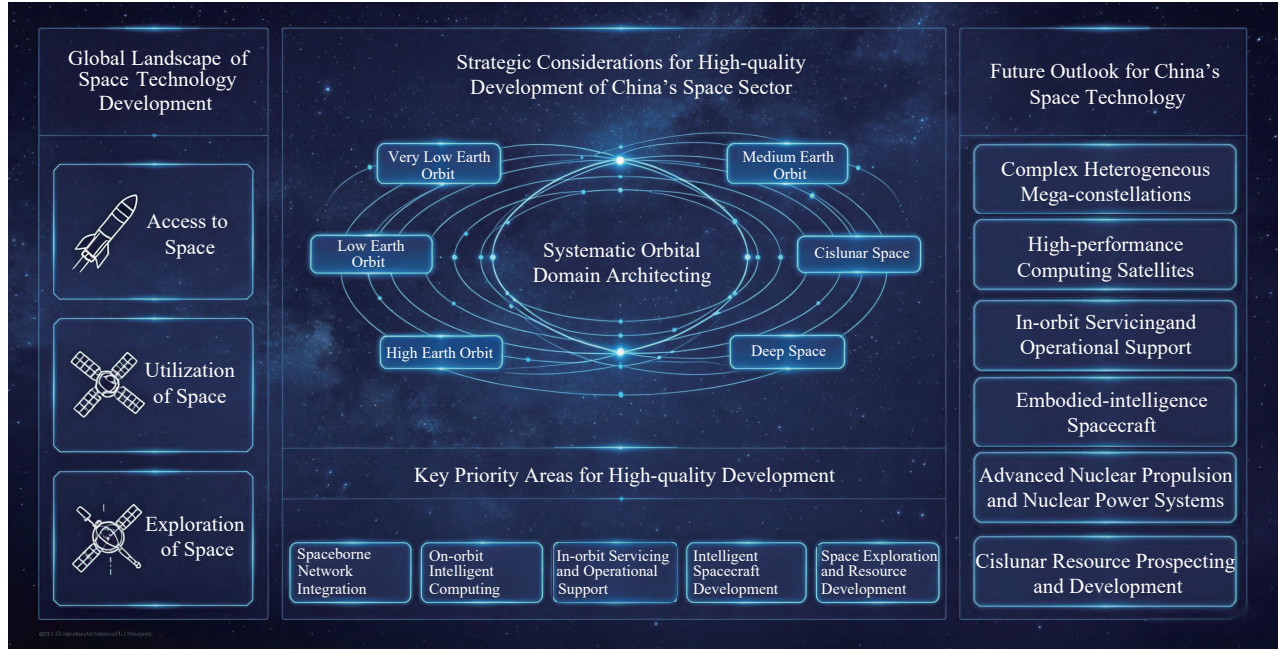
Building upon this spatial framework, the paper further identifies five key areas for the high-quality development of the aerospace sector. The first is space-based network integration, which requires top-level coordination of communications, navigation, remote sensing, and computing constellations and the establishment of standardized cross-orbit links to form an integrated infrastructure system. The second is space-based intelligent computing, which addresses the exponential growth of satellite data and the bottlenecks associated with ground-based processing by deploying computational resources across orbital nodes for real-time data processing and intelligent decision-making. The third is on-orbit servicing and maintenance, which entails transitioning from fixed, non-upgradable hardware toward maintainable and extensible spacecraft through technologies such as refueling, module replacement, and in-orbit assembly. The fourth is the intelligent evolution of spacecraft, shifting from predominantly ground-commanded operations toward autonomous perception, decision-making, and execution, with embodied-intelligence spacecraft potentially playing an important role in debris removal and space security. The fifth is space exploration and development, emphasizing routine cislunar transportation, long-term habitation support, and in situ resource utilization.

Looking further ahead, the paper outlines six strategic directions with phased development roadmaps. The first is complex heterogeneous mega-constellations, progressing from interlayer interoperability and autonomous networking toward seamless, on-demand heterogeneous networks. The second is high-performance computing satellites, evolving from single-satellite computing capabilities through kilowatt-class power platforms toward a global space-based datacenter network. The third is on-orbit servicing and maintenance, advancing from life extension capabilities through modular construction toward intelligent, cluster-based maintenance services. The fourth is embodied-intelligence spacecraft, progressing from prototype validation through the handling of non-cooperative targets toward systematic capabilities for large-scale debris removal. The fifth is advanced nuclear propulsion and power, progressing from small-scale technology verification through kilowatt-class power supply for extreme environments toward integrated propulsion and power platforms. The sixth is cislunar resource exploration and development, advancing from relay networks and safe landing technologies through reusable transfer stages toward a comprehensive development system encompassing resource prospecting, logistics, and sustained habitation.

By systematically advancing these frontier areas and integrating national and commercial capabilities, China can strengthen its technological and industrial foundations, enhance the resilience and competitiveness of its space sector, and support the long-term development of its space capabilities.

Key words: China’s space technology; trends in aerospace development; outlook for space technology development; layout of space domain development; interconnection of heterogeneous constellations, deep integration of aerospace and AI; development and utilization of space resources

Graphical abstract:



(编辑 吴芝明)

引用格式: Zhou Zhicheng, Pu Wei, Liang Bizheng, et al. Prospects for China's space technology development[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(5): 63–72. [周志成, 蒲伟, 梁弼政, 等. 中国空间技术发展展望[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(5): 63–72.]