

统筹空间科学、空间技术、空间应用协调发展的思考

周建平¹, 吴季^{2*}

(1. 中国载人航天工程办公室, 北京 100071; 2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 我国航天事业因历史原因和投入限制, 在初期以空间技术、空间应用为主, 对空间科学重视不足, 空间科学、空间技术、空间应用基本上是独立发展的; 着眼新时期航天强国建设, 需要将空间技术的发展深度融合到空间科学、空间应用中, 从而创造新的机遇和成就。本文剖析了空间科学、空间技术、空间应用的基本内涵并明确三者的相互关系, 在系统分析国际空间科学、空间技术、空间应用的整体态势, 细致梳理我国相关领域发展情况的基础上, 论证了统筹我国空间科学、空间技术、空间应用协调发展的必要性, 凝练了三者协调发展面临的主要问题。空间科学、空间技术、空间应用之间既有需求交叉, 又可互促带动, 应在规划、部署、实施的全过程中进行统筹考虑: 发挥新型举国体制优势, 在统一管理下做好顶层规划; 坚持创新驱动发展战略, 以技术进步抢占国际航天制高点; 支持空间领域基础研究, 培育高水平的科学家和工程师队伍; 加强资源统筹协调, 促进空间应用数据的合理开放和充分利用。

关键词: 航天事业; 空间科学; 空间技术; 空间应用; 协调发展; 数据开放共享

中图分类号: V1 **文献标识码:** A

Coordinated Development of Space Science, Space Technology, and Space Application in China

Zhou Jianping¹, Wu Ji^{2*}

(1. China Manned Space Engineering Office, Beijing 100071, China; 2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Owing to historical reasons and investment restrictions, China's aerospace industry initially focused on space technology and application, with insufficient emphasis on space science; therefore, space science, technology, and application developed independently. The development of space technology should be deeply integrated into space science and application, thus to strengthen China's aerospace industry and create new opportunities and achievements. This study explores the implications of space science, space technology, and space application and clarifies their interrelationships. Moreover, it systematically analyzes the development trend in space science, technology, and application worldwide and reviews the development situation of space-related fields in China. Based on this, it examines the necessity for coordinating the development of space science, technology, and application in China and summarizes the major challenges. Considering their overlapping needs and mutual promotion, space science, technology, and application should be coordinated throughout the process of planning, deployment, and implementation. First, the advantages of the new national system should be exploited to conduct top-level planning under unified management. Second, the innovation-driven development strategy should be insisted to promote the international competitiveness of China's aerospace industry through technological

收稿日期: 2022-06-15; **修回日期:** 2023-01-23

通讯作者: *吴季, 中国科学院国家空间科学中心研究员, 研究方向为空间科学探测计划系统设计和微波遥感技术; E-mail: wuji@nssc.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“统筹我国空间科学、空间技术和空间应用协调发展战略研究”(2020-XY-29); 中国科学院战略性先导科技专项(Y329181AAS)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

progress. Third, basic research in the space field should be strengthened and high-level scientists and engineers should be cultivated. Lastly, resource planning and coordination should be strengthened to promote the rational opening and full utilization of space application data.

Keywords: aerospace industry; space science; space technology; space application; coordinated development; sharing of space data

一、前言

空间科学、空间技术、空间应用之间联系密切,表现为相互促进、相互渗透、相互依存:空间科学是前沿牵引,主要面向世界科技前沿,利用卫星、探测器平台、先进科学探测设施开展重大科学问题的探索和研究;空间应用主要基于各类卫星平台和应用载荷,开展对地观测、空间导航、气象预报、空间通信等业务应用,服务经济主战场和国家重大需求;空间技术是空间科学、空间应用的工程实施基础,提供卫星研制、发射回收、在轨测控、能源保障、在轨服务等技术支持。

空间科学、空间应用是空间活动的主要目的。人类探究太空奥秘的渴望以及人类进入太空后获得的科学、应用、社会、国防等效益,成为推动空间技术持续发展的源动力。在我国,从1970年4月成功发射第一颗人造地球卫星“东方红一号”,到2021年神舟十二号飞行任务3名航天员进驻天宫空间站,航天领域取得了以“两弹一星”、载人航天、探月工程、北斗导航、高分专项、火星探测为代表的一系列重大成就,进入太空、探索宇宙的能力不断增强。这些成就标志着我国航天事业正“由大向强”稳步迈进。

也要客观认识到,我国航天事业虽处大好发展形势,但对标国际航天强国,在空间科学方面的发展较为滞后,在空间技术方面以跟踪研制较多,原始创新尚未全面实现从“跟踪”过渡到“领跑”发展;在空间应用方面,在轨卫星数量已经很多,但应用效能并不显著,大量空间数据被束之高阁。航天领域距离“空间科学、空间技术、空间应用全面发展”的国家要求还有差距,开展空间科学、空间技术、空间应用协调发展研究成为亟需。就已有文献看,极少报道相关研究工作。

本文立足中国航天60多年实践,围绕空间科学、空间技术、空间应用协调发展课题,分析要素内涵及相互关系,回顾国际国内主要发展历程,论证统筹发展必要性;进而针对统筹部署、资源配

置、科学牵引、自主创新、数据应用等方面的差距提出应对策略,以期为新发展格局构建背景下航天事业高质量发展研究提供启发和参考。

二、空间科学、空间技术、空间应用的内涵及相互关系

(一) 空间科学、空间技术、空间应用的内涵

空间科学指以航天器为主要平台,研究发生在日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理、天文、地球、化学及生命等自然现象及其规律的交叉性、综合性学科^[1]。针对空间的研究,起源于低层大气研究,逐步向高空大气拓展。早期的高空大气科学以及20世纪初起步的电离层研究可视为空间研究的起步工作。1957年以后,通过人造卫星发现了辐射带的存在,促进了空间研究的快速发展,在中高层大气物理、电离层物理的基础上逐步形成了磁层物理和行星际物理。至此,空间物理学(空间等离子体物理)成为早期空间研究或空间科学的核心学科。在20世纪60年代后,卫星逐渐用于对地观测、对天(宇宙)观测,航天技术开始与地球科学、天文学交叉并形成了空间地球科学和空间天文学,为空间科学扩充了新内容。此后,随着载人航天的发展,微重力科学、空间生命科学也成为空间科学的重要学科,深空探测则极大推动了行星科学、天文学、地球科学、空间物理学的发展。空间基础物理研究可视为物理学基础研究在空间的延伸。

空间技术指航天器及航天运输系统的设计、制造、试验、发射、运行、返回、控制、管理、使用等方面的综合性工程技术^[2],起源于以运载火箭为代表的进入空间技术。在运载火箭技术逐步成熟后,航天器技术开始快速发展。航天器在地球大气层以外的宇宙空间(太空)按照天体力学的规律运行,广泛运用了能源、控制、测控通信、材料、半导体器件等电子信息、物理学技术。

空间应用指利用空间科学和技术成果服务人类社会的科技领域的总称^[1]。在航天技术、空间科学

的带动下,空间技术从20世纪60年代开始逐渐走向应用。最早的应用领域是卫星通信、对地观测:前者因其覆盖面广、具有全球通信能力而得到快速普及,代替了短波无线通信、有线电报通信;后者率先应用于军事侦察,之后在气象、海洋、城市规划、土地利用、灾害监测等方面得到了广泛应用。再往后,随着空间科学、空间技术的能力提高,卫星导航逐渐进入应用领域,成为人类活动不可或缺的信息保障手段;通过观测太阳和地球空间,人们发现由太阳爆发引起的空间天气事件能够显著影响空间轨道上的卫星、地面上的部分高技术基础设施,这反映了空间气象预报的重要应用价值。此外,载人航天的发展,驱动形成了空间科学基础研究、对地观测试验方面的丰富成果,转化形成了材料制备、生命生物技术的研发基础,拓展了一系列新应用领域。

(二) 空间科学、空间技术、空间应用的相互关系

空间科学在探索未知的发展道路上不断向空间技术提出新需求,如更高的分辨率、更高的姿态测量与控制精度、更高的定轨精度、更大的载荷与平台服务系统质量比等。空间科学对空间应用起着输出新理论和新概念、提供科学支撑的作用;探索的新规律、创造的新理论一旦明确应用价值,将快速被应用部门采纳,成为经济社会、大众民生的发展助力。空间技术对空间科学、空间应用具有支撑和推动作用;快速发展的空间技术,激励着科学家思考如何将之应用于空间科学任务以提出新的空间科学计划、获得新的科学发现。因此,空间应用的发展依赖空间科学、空间技术的发展;空间应用在自身的发展过程中,也对空间科学、空间技术不断提出新需求。

经过60多年的发展,空间科学、空间技术、空间应用成为国家空间活动中相对独立的部分,但三者之间存在非常紧密、相互依存、相互促进的关系(见图1)^[2-4]。如果没有新的空间科学、空间应用的牵引,空间技术将失去发展动力;一旦空间技术没有进步,空间科学就无法达到新高度、探索新领域,空间应用也难以增强为人类社会发展和进步提供服务的能力^[1,5]。

新一轮科技革命和产业变革深度演进、相互交织,国家之间的科技竞争更为激烈。在此背景下,

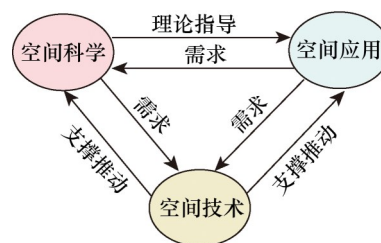


图1 空间科学、空间技术、空间应用的关系

空间科技的战略地位更为突出;多主体融合成为科研突破的主要组织方式,技术要素流通更为丰富活跃,数据挖掘应用的价值潜力巨大。因此,空间科学、空间技术、空间应用应交叉融合发展,强调单一或个别生产要素的重要性已与时代发展要求不相适应。

三、国际空间科学、空间技术、空间应用的整体态势

整体来看,国际空间科学、空间技术、空间应用是相互支持和协调发展的。空间应用的发展是在空间技术不断发展的支持下取得的,空间应用又推动了空间技术的发展;空间技术的发展离不开空间科学的支持和引领。

(一) 国际空间科学发展

从美国第一颗人造卫星(探险者1号)发现地球辐射带、建立空间科学领域第1个分支学科(磁层物理学)至今,空间科学获得了长足发展,以空间物理学与太阳物理学、空间天文学、月球和行星科学、空间地球科学、空间生命科学、微重力物理科学等为代表。目前,人类对地球大气层以外空间已有深入了解,建立了较为精细的地球电离层及磁层数字模型,明确了与太阳活动的紧密联系。从20世纪60年代初开始,人类已经着陆和飞越探测了月球以外所有8大行星及其部分卫星;人类的航天器正在飞向太阳,期望能够抵近发现太阳爆发的机制。利用空间天文望远镜,人类确认了宇宙大爆炸的起源,对星系、黑洞以及暗物质、暗能量等开展了研究。在空间站平台上,人类持续探索了不受重力影响的物质和生命运动的基本规律,发现了很多新规律,在未来人类的太空长期生存、地球上人类生命改善等方面具有积极意义。

当前，世界航天大国持续关注空间科学，更为聚焦基础科学重大问题研究，如暗物质性质与暗能量本质、恒星及星系演化、黑洞性质、太阳系形成演化、外太空生命与宜居行星探索、基本物理规律研究、地球变化趋势等。其中，欧美的大型空间科学任务规划围绕宇宙起源演化、天体高能过程、太阳系生命与系外行星生命探索等方向，侧重平衡性投资，采取多层次、灵活性的项目计划及滚动发展机制，征集竞争性提案以遴选科学研究项目^[6]。

（二）国际空间技术发展

自从1957年苏联成功发射第一颗人造卫星以来，空间技术发展迅速。运载火箭的有效载荷能力从数十千克增长到数十吨。通信卫星具有体系化、网络化发展特征，资源卫星具备高分辨率、多谱段的遥感能力，气象卫星可提供长期气象预报资料，导航卫星精度达到亚米级。很多国家具备了回收卫星的能力。在载人航天方面，人类在空间停留的时间已经从数小时提高到1年以上。在深空探测方面，开展了太阳系行星探测、空间天文观察^[7]。

鉴于发展空间技术所具有的政治、经济、国防、科学技术等重大意义，很多国家加大空间技术研究投入，将其作为促进经济社会发展、提升国防建设实力的重要支柱。空间技术的战略地位和综合作用凸显，未来将继续保持稳健发展势头。

（三）国际空间应用发展

当前，绝大部分国家和地区都在应用空间技术成果，如卫星通信技术应用于各种信息的广域、高速传递，卫星导航定位技术应用于海、陆、空各类装备的行驶导航，测绘卫星用于资源调查和地形测绘，气象卫星用于气象预报与灾害预警。空间技术也普遍用于侦察、预警、导航、气象等军用领域。此外，太阳爆发及其对地球影响的研究已进入预报应用阶段，空间生命科学研究逐渐发展到空间制药等实用化阶段；基于遥感卫星图像开展的大量科学研究与分析，逐步揭示了地球变化的基本规律、人类活动对地球的影响机理，如极区上空的臭氧洞与人类活动的气体排放密切相关^[7]。

空间应用正在进入新发展阶段。世界航天大国努力培育和壮大本国的空间应用产业，加快空间技术成果向经济社会的应用转化；培育太空旅游、太

空育种等太空经济新业态，推动空间应用与数字经济深度融合，深化“通导遥”信息综合应用等。

四、我国空间科学、空间技术、空间应用的发展情况

中国航天60余年辉煌发展，取得了众多里程碑式的成就。近年来，建成了较为完备的学科体系与科研平台，发展了科学卫星载荷平台一体化设计、地外天体“绕落回”能力、全球布局的深空测控网、大型运载火箭等，为空间科学与深空探测任务实施提供了坚实基础^[8-12]。

（一）我国空间科学发展

在空间科学方面，我国逐步建立了较为完备的学科体系、若干具有一定水平的科研平台，具备开展空间科学任务的基本能力。863计划、实践卫星系列、载人航天工程的实施，切实推动了空间科学的全面发展^[13,14]。

2003年，我国首个由科学目标牵引的空间科学卫星项目（双星计划）成功实施。自“十二五”时期以来，中国科学院战略性先导科技专项（一期）4颗科学卫星先后成功发射，包括暗物质粒子探测卫星（“悟空”）、实践十号返回式科学实验卫星、量子科学实验卫星（“墨子”）、硬X射线调制望远镜（“慧眼”）；用于全球大气CO₂观测的科学实验卫星（碳卫星）成功入轨。在空间探测方面，嫦娥工程顺利实施，嫦娥四号首次着陆月球背面，嫦娥五号标志中国具有月球采样返回能力；“天问一号”成功执行首次火星探测任务，携带的“祝融号”火星车成功登陆火星；工程规划中已部署了小行星、木星系、行星穿越探测任务。载人航天工程基本建成我国近地载人空间站。

从2018年开始，中国科学院战略性先导科技专项（二期）部署了引力波暴高能电磁对应体全天监测器、先进天基太阳天文台、爱因斯坦探针、太阳风-磁层相互作用全景成像卫星等系列卫星计划，梯次安排了卫星背景型号及预先研究工作。中国和法国的空间科学合作深化，空间暂现源观测任务进入工程实施阶段，水循环卫星处于立项研制阶段。此外，载人航天工程规划了载人飞船-空间实验室-空间站“三步走”发展蓝图，载人空间站及其

科学任务同样为空间科学研究提供了重大机遇,可开展系列化的人体科学、空间生命、物理科学等实验研究。

目前,我国形成了构成完整的空间科学研究队伍,涉及单位超百个,着重开展空间科学相关的理论研究、数值模拟、实验研究、载荷研制、技术保障等。然而,相关研究较多依赖对国际公开数据的二次分析,独立开展空间科学任务、创新实施空间探测任务的能力不强,相较国际一流水平仍有明显差距^[15,16]。例如,我国在空间地球科学、空间物理、太阳物理方向具有一定优势,但在太阳系探测、空间生命科学等方向明显滞后。

(二) 我国空间技术发展

我国航天事业是在基础工业薄弱、科技水平落后以及特殊的国情、特定的历史条件下发展起来的,自1956年创建以来经历了艰苦创业、配套发展、改革振兴、走向世界等重要时期。我国独立自主地进行航天活动,以较少的投入并在较短的时间里走出了一条适合国情、显现特色的发展道路,取得了一系列重要成就^[17]。目前,形成了完整配套的研究、设计、生产、试验体系,建立了能发射各类卫星和载人飞船的航天器发射中心,由国内各地面站、远程跟踪测量船、中继卫星组成的测控网,实现了多种卫星系统应用并取得良好的综合效益;建立了具有一定水平的空间科学研究系统,培育了一支技术水平较高的航天科技队伍。

随着长征五号等新一代运载火箭成功应用,我国进入空间的能力和效率大幅跃升。以“东方红五号”为代表的新一代卫星平台,实现了我国卫星技术从“跟随”到“并跑”甚至部分“领跑”的转变。近年来,我国航天发射活动持续取得重大突破,发射数量在全球总量中的比例持续提升,单年发射次数突破40次、入轨载荷质量超过100 t。

在卫星研制领域,我国发展形成了返回式遥感卫星系列、“东方红”通信广播卫星系列、“风云”气象卫星系列、“实践”科技试验卫星系列、“资源”地球资源卫星系列、“北斗”导航定位卫星系列、“海洋”卫星系列等。“风云”“海洋”“资源”“高分”“遥感”“天绘”等对地观测卫星系列,环境与灾害监测预报小卫星星座等进一步完善。固定通信、移动通信、数据中继等卫星系统加快建设,

北斗卫星导航系统迈进全球服务新阶段。

我国已经开展或部署月球采样返回、火星着陆、小行星飞越等多个地外天体探测任务。在月球探测方面,自2004年首次绕月探测工程立项实施以来共完成了6次探测任务,在空间技术、空间科学与应用、国际合作等方面成效显著;获得了7 m(全局)/1.5 m(局部)精度的月球遥感图像,实现了月球表面软着陆(着陆精度优于700 m)、月球表面巡视探测(移动速度达到200 m/h),发射了月球中继卫星并首次实现地月L2点中继星对地/对月的测控及数传中继,完成了月球采样返回(带回的月壤质量为1731 g)。在火星探测方面,首次任务“天问一号”火星探测器已发射入轨,环火星飞行顺利实施,巡视器成功着陆火星,“祝融号”火星车开展了火星巡视任务^[18,19]。相关任务的顺利实施,标志着我国深空探测技术的重大进步、地外天体探测能力的大幅提升。

(三) 我国空间应用发展

目前,我国在轨运行的应用卫星数量超过300颗,形成了以“中星”“亚太”“天通”系列卫星为代表的通信卫星体系、以“风云”“资源”“海洋”“环境减灾”“高分”系列卫星为代表的遥感卫星体系。这些应用卫星与北斗卫星导航系统共同构成我国空间基础设施,反映了较为完善的卫星应用体系能力,取得了显著的综合效益。我国有关机构积极利用国外应用卫星开展应用技术研究,成效良好^[20]。我国已是对地观测、导航、通信、气象预报等空间应用大国,跻身国际先进水平之列,部分优势方向处于国际领先水平。依托载人航天工程开展的陆地、海洋、大气观测试验具有国际领先水平,带动相关领域的技术发展。

我国空间应用虽然发展迅速,但相比航天强国仍有相当大的差距。我国面向经济社会发展重大需求,将加强卫星公益服务和商业应用,加速航天技术成果转移和转化,推动空间应用产业化发展。例如,强化卫星应用与行业/区域发展的融合力度,推动空间信息与大数据、物联网等信息技术的深度融合,深化陆地、海洋、气象等遥感卫星数据综合应用,建设北斗导航+卫星通信+地面通信网络融合的应用基础设施,增强精细化、精准化、业务化的服务能力^[2]。

我国把握数字产业化、产业数字化的发展机遇，面向经济社会发展和大众生活的多样化需求，积极开展航天成果转化与技术转移，丰富应用场景并创新商业模式，提升空间应用与数字经济发展的融合水平。拓展卫星遥感、卫星通信等应用的广度与深度，实施北斗卫星导航系统产业化工程，为行业生产、大众生活提供经济优质的产品与便利服务。培育发展太空旅游、太空生物制药、空间碎片清除、空间试验服务等太空经济新业态，提升航天技术的产业化效益^[2]。

五、新时期我国空间科学、空间技术、空间应用协调发展的必要性及面临的问题

(一) 统筹空间科学、空间技术、空间应用协调发展的必要性

航天事业是国家整体发展战略的重要组成部分，已进入发展“快车道”。然而与国际上空间科学、空间技术、空间应用相互促进并协调发展的态势相比，我国空间科学、空间技术、空间应用3个方面基本上是各自独立发展的。特别是空间科学，近年来得益于综合国力的增强才纳入航天事业发展序列。立足新发展阶段，贯彻新发展理念，构建新发展格局，按照高质量发展要求，将空间技术的发展深度融入空间科学、空间应用中去，从而创造新的发展机遇和重大成果，推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展。这是国家发展大局的客观要求、建设航天强国的必然需求，成为新时期我国航天事业的主导发展方向。

从新科技革命发展规律的角度看，采取要素融合的发展范式，往往形成重大突破的“奇点”、跨学科创新的“链式反应”，从而带来“情理之中、意料之外”的发展成果。① 前沿技术的链式变革将带来若干领域的革命性变化。前沿引领技术、关键共性技术、现代工程技术等从点状突破向链式变革发展，可产生催化、叠加、倍增效应，推动空间、海洋成为拓展人类文明的新疆域。② 跨界融合创新将带来若干领域的颠覆性创新。信息、生命、制造、能源、空间、海洋等领域的交叉融合与创新突破，可激发技术应用场景的爆发式增长，从而驱动原有技术体系、产业格局出现颠覆性变化。③ 新一代信息技术深度应用，将带动若干领域的数字化浪

潮。大数据、人工智能、量子信息、物联网、区块链等方向创新活跃、快速发展、融合应用，将深刻影响包括空间领域在内的未来发展格局。

具体到空间领域，空间技术进步可为空间科学发现提供新手段，如超高分辨率成像、超稳卫星平台、超稳时钟等；空间科学为了获得新发现，必然提出更高的技术突破要求、到达从未到过的天体或区域，这将带动空间技术的进一步发展；空间科学的新发现，也可带动新型空间应用，如解译已有遥感图像蕴含的未知信息、探索利用地外资源等；为了发展新型空间应用会提炼新的科学问题，也就需要新的空间科学研究以实现新突破。空间应用、空间技术的关系，与空间科学、空间技术的关系类似，是相互支撑、需求拉动的耦合关系。

(二) 空间科学、空间技术、空间应用协调发展面临的问题

在我国，空间科学、空间技术、空间应用的任务属性、特征、内容、目标等不尽相同，通常承担3类任务的研制单位不同、管理部门不同，导致了国家层面的协调发展机制、综合发展规划均有所缺失的局面。在计划及经费、资源利用、设施建设等方面未能实现统筹，制约了共享共用和协调发展水平。空间科学、空间技术、空间应用协调发展面临的主要问题如下。

一是国家层面缺少空间科学、空间技术、空间应用发展的协调机制。① 空间科学的主要研究力量分布在中国科学院和部分高校（不属于应用卫星主管部门、航天工业部门），相关发展需求往往得不到主管部门（审批航天任务）的重视。② 空间技术的主要研发力量属于国防工业体系，相应主管部门并没有承担基础科学研究、实现科学前沿突破的职责（关注点集中在完成国家任务、确保“万无一失”）；运用创新技术的积极性会受到一定制约，而单独发射技术实验类卫星缺少科研类支持渠道。③ 空间应用部门分散在气象、海洋、资源等具体的国民经济领域和社会公益管理部门，基本处于互相独立运行、数据极少交换的局面。

二是空间科学、空间技术、空间应用的资源保障力度不平衡。一直以来，我国空间科学领域的经费投入相比航天强国差距较大。例如，美国航空航天局的年度预算有接近1/3用于空间科学领域，而

我国同类经费投入中的相应占比尚不足5%，在投入方向的平衡度上也有差距。

三是国家重大航天任务规划布局中有关科学目标牵引内容偏少。我国实施了载人航天、月球探测等重大工程任务，但在任务推进前期重在实现工程目标，没有将科学目标列为工程任务的主要考核内容；通常是在重大任务实现成功后，再考虑科学目标的发现和突破课题。这种处理方式往往导致任务方案设计时忽略了有利于科学目标实现的技术要求及指标。

四是空间技术领域面临“卡脖子”以及原始创新能力不足等问题。为了实现当前亟需的工程任务，航天技术实施部门往往没有精力和经费来探讨新技术突破与创新实现，如可重复使用运载火箭、可重复使用航天器等发展方向。因内生动力、经费设置方面的原因，国内相关技术发展已滞后于国际商业航天企业。

五是空间应用的数据利用、交叉融合有待加强。空间应用数据特别是空间遥感数据，通常是可以交叉融合利用的，如海洋上方的大气物理过程与海面温度、海面动力具有密切关联。若能以交叉融合的形式开展空间数据利用，将会显著提升数据的利用率并深度发挥数据的应有作用。

六、我国空间科学、空间技术、空间应用协调发展建议

统筹空间科学、空间技术、空间应用协调发展是建设航天强国的必由之路。形成先进的空间科学探索水平和能力，是科技强国、航天强国的重要标志，也是实现高水平科技自立自强的重要内容。建议采取有力措施，解决我国空间领域发展不均衡、不充分的问题，更好发挥空间科学、空间应用的需求牵引作用，实现空间科学、空间技术、空间应用的协调发展；在国家主管部门的组织下，发挥新型举国体制优势，统筹空间领域发展布局，特别是在中长期规划中加强对系列科学卫星、行星探测工程、载人空间站应用等的支持；充分利用重大航天任务机会，取得科学前沿的重大原创成果，同时带动空间技术、空间应用的创新突破。

一是充分发挥新型举国体制优势，在中央统一领导下做好顶层规划。可设置跨部门协调机制并明

确具体业务部门，统筹开展空间科学、空间技术、空间应用的发展战略、规划制定、任务部署、资源调配、条件建设工作，争取纳入国家科技创新体系，通过国家实验室、国家重点实验室群等形式给予充分的机制保障。

二是坚持创新驱动发展战略，以技术进步抢占国际航天制高点。在空间科学、空间技术、空间应用等具体方向，加快建立原始创新激励机制，形成内生的创新驱动生态，力争在重点方向尽快实现“领跑”。可在国家航天工程任务中增加促进空间科学研究、支持前沿技术创新的相关内容，纳入工程评价体系；可设立首席科学家或首席技术专家岗位，配以相应工作团队及资源保障。

三是加强空间领域基础研究支持力度，培养高水平的科学家和工程师队伍。科学研究需要长期积淀，空间科学同样如此。高水平的空间科学研究多具有基础研究属性，需要一定规模的空间科学家队伍进行连续性探索，也需要国家给予长期稳定的资源保障，才能实现产出高水平成果、培育高水平团队的初始目标。建议国家设立支持空间科学研究的专项经费，纳入国家财政预算，争取2030年实现空间科学投入占国家航天总投入15%的目标。

四是加强规划协调，更加充分地开放和利用空间应用数据。在保障国家安全的基础上，最大限度地开放对地观测等类别的应用数据，尽可能地减少地域、分辨率、频谱等方面的不合理限制；促进数据融合的基础理论研究并提升综合应用效益，释放在轨应用卫星的潜在价值，实现卫星应用效益的最大化。

致谢

课题研究及本文写作得到以下同志在调研、素材整理、参加讨论等方面的支持：王礼恒、顾逸东、王赤、包为民、陈善广、庞红勋、时蓬、张善从、杨帆、杨宏、孙丽琳、陈向、魏海燕、巴金、韩淋，谨致谢意。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 15, 2022; **Revised date:** January 23, 2023

Corresponding author: Wu Ji is a research fellow from the National Space Science Center of Chinese Academy of Sciences. His major research fields include space science exploration planning system design and microwave remote sensing technology. E-mail: wuji@nssc.ac.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic

Study on Coordinated Development of Space Science, Space Technology, and Space Application in China” (2020-XY-29); Strategic Leading Science and Technology Project of Chinese Academy of Sciences (Y329181AAS)

参考文献

- [1] 吴季. 空间科学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Wu J. Space science introduction [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2021 中国的航天 [EB/OL]. (2022-01-28) [2022-12-25]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1719689/1719689.htm>.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's space activities in 2021 [EB/OL]. (2022-01-28) [2022-12-25]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1719689/1719689.htm>.
- [3] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2000 中国的航天 [EB/OL]. (2000-12-01) [2022-12-25]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/ztd/jjhtkzjzwtm/bps/202203/t20220328_63897.html.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's space activities in 2000 [EB/OL]. (2000-12-01) [2022-12-25]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/ztd/jjhtkzjzwtm/bps/202203/t20220328_63897.html.
- [4] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2016 中国的航天 [EB/OL]. (2016-12-27) [2022-12-25]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1537007/1537007.htm>.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's space activities in 2016 [EB/OL]. (2016-12-27) [2022-12-25]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1537007/1537007.htm>.
- [5] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略·空间科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. Disciplinary development strategy in China: Space science [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [6] 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.
Gu Y D. Thoughts on space science development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1031–1049.
- [7] 闵桂荣. 世界空间技术发展趋势 [J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22(2): 1–3.
Min G R. The future development of space technology in the world [J]. World SCI-Tech R & D, 2000, 22(2): 1–3.
- [8] 栾恩杰. 中国的探月工程——中国航天第三个里程碑 [J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 31–36.
Luan E J. China's lunar exploration program—The third milestone for China's space industry [J]. Strategic Study of CAE, 2006, 8(10): 31–36.
- [9] 叶培建, 邹乐洋, 王大珩, 等. 中国深空探测领域发展及展望 [J]. 国际太空, 2018 (10): 4–10.
Ye P J, Zou L Y, Wang D Y, et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration [J]. Space International, 2018 (10): 4–10.
- [10] 周建平. 让中国人探索太空的脚步迈得更稳更远 [EB/OL]. (2000-05-06) [2022-12-25]. [http://www.81.cn/jfjbmapp/content/2000-05-06/content_260569.htm](http://www.81.cn/jfjbmapp/content/2020-05/06/content_260569.htm).
- [11] 吴季. 深空探测的现状、展望与建议 [J]. 科技导报, 2021, 39(3): 80–87.
Wu J. Deep space exploration: Status, expectation and suggestion [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(3): 80–87.
- [12] 顾逸东, 吴季, 陈虎, 等. 中国空间探测领域 40 年发展 [J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 10–21.
Gu Y D, Wu J, Chen H, et al. Review of the 40-year development of China's space exploration [J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 10–21.
- [13] 吴季. 2016—2030 年空间科学规划研究报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Wu J. 2016—2030 space science planning research report [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [14] 王赤, 窦贤康, 龚建村, 等. 空间物理学最新进展与展望 [J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 1–9.
Wang C, Dou X K, Gong J C, et al. Recent advances and prospect in space physics [J]. Journal of Space Science, 2021, 41(1): 1–9.
- [15] 杨帆, 王海名, 韩淋, 等. 空间科学领域态势分析评估报告 [R]. 北京: 中国科学院科技咨询战略研究院, 2018.
Yang F, Wang H M, Han L, et al. Report on situation analysis and assessment in space science [R]. Beijing: Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [16] 中国科学院空间科学战略性先导科技专项课题组. “面向空间科学发展战略与组织管理的情报研究”课题报告 [R]. 北京: 中国科学院科技战略咨询研究院, 2019.
Special Research Group for Strategic Pilot Science and Technology of Space Science, Chinese Academy of Sciences. Report on the project of “Information research for space science development strategy and organization management” [R]. Beijing: Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [17] 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.
Bao W M, Wang X W. Prospect of airline-flight-mode aerospace transportation system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(3): 1–6.
- [18] 于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述 [J]. 深空探测学报, 2016, 3(4): 307–314.
Yu D Y, Wu X Y, Wu W R. Review of technology development for Chinese lunar exploration program [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 307–314.
- [19] 刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(9): 1126–1139.
Liu J Z, Hu C B, Pang F C, et al. Strategy of deep space exploration [J]. Scientia Sinica Technologica, 2020, 50(9): 1126–1139.
- [20] 李德仁, 沈欣, 李迪龙, 等. 论功能融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1501–1505.
Li D R, Shen X, Li D L, et al. On civil-military integrated space-based real-time information service system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1501–1505.