

美国在国际空间站上的技术开发 与验证应用领域研究

摘要：本文首先对国际空间站总体应用情况进行分析，重点是美国在国际空间站上的应用，然后研究技术开发与验证应用领域的应用目标、应用方向和重点项目、应用规划、主要应用设施及应用效益，总结应用特点，得出对我国空间站未来应用的几点启示。

作为全球最大的在轨航天器，国际空间站(ISS)已实现连续有人驻留超过15年，已在空间应用领域取得了众多成果，延寿至2024年，将为近地空间带来更大发展。目前，国际空间站三项首要应用研究目标是：使孩子们成为未来空间活动的领导者和探索者；将在空间研究中获得的知识回馈社会、带来益处；为载人探索近地轨道以远的目的地做准备。为实现应用目标，国际空间站已在技术开发与验证、物理科学、人体学研究、教育活动与推广、地球与空间科学、生物学与生物技术等六大领域发挥了重要作用。目前已有超过14个国家的航天员到访过国际空间站，来自95个国家和地区的2400余名研究人员共开展了超过1700项实验，产生了丰硕成果。国际空间站成员国一致认为，最大限度地提高国际空间站研究能力可能带来新的探索机遇、促进商业发展并对教育事业产生积极影响。从国际空间站的应用目标可以看出，技术开发领域的应用是其重点。作为一个独有的技术开发与试验平台，国际空间站将为未来长期的探索任务所需的技术、系统和材料以

及地球上使用的新技术提供独一无二的试验条件。

由于美国对国际空间站应用的组织管理、项目规划和实施最为系统，因此本报告以美国为主，介绍应用管理和应用项目等。

一、概述

尽管各国航天机构对于国际空间站应用目标的侧重点不同，但各国在一些重要的全局性目标上是一致的。首先，国际空间站作为一个教育平台，鼓励、激励、推动年轻一代从事数学、科学和工程领域的工作。其次，提高人们在人体生理学、生物学、材料和物理科学方面的认识，并将这些认识转化成对健康、社会经济效益和环境有益的成果。最后，国际空间站上开展的人体学研究、辐射、材料科学和工程领域的应用可应用于未来低地球轨道以远的载人探索任务中。从国际空间站的应用目标可以看出，技术开发领域的应用是其重点。技术开发与验证领域的应用管理遵循国际空间站总体应用管理。

目前，针对美国国家航空航天局、国家实验室和国际合作开展的研究，美国采取由美国国家航空航天局载人探索和运行任务部指导，由位于约翰逊航天中心的国际空间站计划办公室和位于肯尼迪航天中心的空间科学促进中心分别管理，由美国国家航空航天局相关领域中心、非营利组织和各国航天合作机构分别实施项目的管理结构。

国际空间站科研活动的管理机制方面，美国主要通过合同管理和项目管理的方式，针对研究项目的策划、批准、实施和评估等环节，遵循相关政策和程序，对国际空间站计划中的研究工作实施管理、指导和监督。目前，国际空间站研究任务和项目的实施经历五个步骤：获得研究资助、战略规划、战术规划、实施阶段和飞行后运行。其中，美国负责管理的国际空间站上的有效载荷，按照经费来源，可以分为三类：第一类是美国国家航空航天

局支持的研究项目；第二类是美国国家实验室支持的研究项目，包括美国商业部门、非营利机构以及其他美国政府部门，如国防部、国家卫生研究院等；第三类是与国际空间站成员国联合支持的研究项目。

目前，国际空间站应用主要集中在6个领域，分别是技术开发与验证、物理科学、人体研究、教育活动与推广、地球与空间科学以及生物学与生物技术。此外，国际空间站还提供了商业应用机会。技术开发与验证是其中重要领域之一。国际空间站为未来近地轨道以远的探索活动和新技术开发提供了一个独一无二的在轨试验机会。这一学科涵盖了技术发展的许多应用，包括环境监测，通信，微重力环境特征，微、纳米和皮卫星、航天器系统以及机器人技术。重点领域包括航天器材料和系统，国际空间站上微重力环境的特征及其控制等。从研究领域角度看，生物学和生物技术领域实验最多，其次分别为技术开发与验证、人体研究、教育活动与推广、物理科学、地球和空间科学领域。由此可见，“技术开发与验证”是当前国际空间站最重要的应用领域之一。此外，从成果发表上看，技术开发与验证领域在会议上的发表数量是高居榜首，由此可见在国际空间站应用中的重要程度。

二、技术开发与验证应用领域规划及效益

(一) 应用目标

国际空间站的任務目标是开展科学和技术研究，扩展人类知识，激励并教育下一代，鼓励航天商业开发并验证未来低地球轨道(LEO)以远探索任务的能力。国际空间站为空间应用的开展提供了良好的平台，技术试验平台的作用日益凸显。当前，技术开发与验证已成为国际空间站最重要的应用领域之一。为了落实任务目标，特别是技术开发，国际空间站已作为一个试验平台验证操作技术和能力，验证用于改进空间科学能力和低地球轨道以远

载人和机器人探索的技术和先进系统，而验证这些先进能力是国际空间站计划的一个主要目标。

目前，美国国家航空航天局正在国际空间站上开展“机器人燃料加注任务”(RRM)、空间通信与导航(SCaN)试验台、3D打印等多项技术试验。延寿计划的提出，一方面将巩固美国在载人航天领域的领导地位，保持以美国为核心的国际合作伙伴关系，并在更广泛的领域促成美国的全球领导力；另一方面，实现国际空间站全面应用、价值最大化的目标；此外，推动商业化进一步发展。

(二) 应用规划

国际空间站是目前在用的唯一长期在轨试验平台，可用于验证先进技术和运行概念。通过与探索团体的密切合作，国际空间站上开展的技术试验项目可支持未来的探索活动。美国国家航空航天局已经确定国际空间站能够支持的12个探索技术方向：空间推进，乘员健康、生命保障与居住系统，空间电源与能源，机器人、遥机器人与自主系统，通信与导航，生命保障与居住系统，探索目的地系统，科学仪器，进入、下降与着陆系统，材料结构、机械系统与制造，热管理系统，运行流程与程序。

对于上述技术验证方向，梳理出空气—氧气、空气—二氧化碳、水、废弃物、环境监制、火灾/防护、辐射、乘员健康与性能、发电、能源存储、传感与感知、移动与操控、人体系统/自主性、自主交会对接、通信/网络互联、定位、导航与授时、飞行乘员模拟、自主任务操纵、低温系统、热控系统、热防护系统、仪器与认知、气动辅助与进入、电推进、可支持性与可维护性、先进居住系统、遥感与敏感器、观测台、材料与机械系统、结构等领域，从在轨、近期、规划三个方面进行分类，梳理已经开展、即将开展和计划开展的技术验证项目。

(三) 应用方向及重点项目

围绕支撑低地球轨道探索活动这一主要目标，国际空间站正在开展一系列技术开发项目，包括 21 个应用方向，按照应用类别可将 21 个应用方向分为 8 类(见表 1)。

表 1 技术方向

序号	技术类别	技术方向
1	设备与系统	航天电子设备与软件
		实验硬件特性描述
		发电/配电系统
2	乘员健康、生命保障与居住系统	舱外活动系统
		食品与服装系统
		生命保障系统与居住舱
3	空间环境	微重力环境测量
		航天器与轨道环境
		辐射测量与防护
		航天器中的微生物族群
		空气、水与表面监测
		火灾控制和防护
4	卫星应用技术	通信与导航
		成像技术
5	机器人技术	机器人
6	材料与结构	维修与制造技术(3D)
		“毕格罗”太空舱
		航天器材料
		小卫星与控制技术
7	商业应用转化	商业验证
8	热管理	热管理

这里重点介绍当前国际空间站重点开展且应用相对广泛的几类技术开发计划。

1. 卫星在轨服务

美国国家航空航天局卫星维修能力办公室(SSCO)负责美国国家航空航天局在轨服务技术与能力的总体管理、协调与实施。为实现上述目标,正在开展以下工作:研究概念任务的设计要点,建造在轨试验的硬件和软件,管理技术开发活动和维修任务,设计并为协作维修元件提供建议。目前,正在利用国际空间站验证卫星在轨服务所必需的技术,支持载人探索和科学发现。

2. 机器人技术

国际空间站上的航天员承担的任务大多依靠人和机器人系统的协同:一方面乘员使用舱内活动和舱外活动机器人开展任务,另一方面航天器上和地面任务控制中心的自主系统也在提供支持。国际空间站上现有的若干空间机器人系统代表着该技术领域的当前最高水平,包括加拿大和美国国家航空航天局联合研制的移动服务系统(MSS)、欧洲航天局和俄罗斯联邦航天局合作研制的欧洲机械臂(ERA)、日本实验舱机械臂系统(JEM-RMS)等,这三种系统均可抓取、转移、释放多种有效载荷,也可转移舱外活动航天员并用作其工作平台。

此外,美国国家航空航天局最新研制并发射的第二代(类)人形“机器人航天员”2(R2)于2011年进驻站上,采用当时最先进的控制、传感和视觉技术,具备与人类相近的操纵能力,其机械手和前臂的设计近似实现了人手功能,主要用于验证类人形机器人技术及应用,探索零重力下的灵巧操作,测试人类—机器人安全系统,以辅助人类乘员执行未来的探索任务。

3. 小卫星释放

当前,国际空间站提供了一个独特的平台在低地球轨道发射、部署小卫星。目前主要通过日本“希望”号气闸舱内的机械臂完成小

卫星发射，该小型气闸舱可用于立方体卫星在低地球轨道的部署。国际空间站渐成“天基发射场”，丰富了微纳卫星发射手段，实现了卫星在轨批量储备、按需发射和及时补网，同时低成本也使得更多小运营商拥有利用空间的机会，能够参与卫星在轨设计和测试。

(四) 应用效益

国际空间站的价值主要体现在三个方面：工程成就、国际合作成就和研究成果。其研究和技术在科学发现、地球、空间探索方面带来效益。美国于 2015 年 6 月最新公布的第二版《国际空间站造福人类》报告中指出，其效益存在于 5 个方面：人体健康、地球观测和灾害响应、创新技术、全球教育和太空经济开发。创新技术部分，将技术验证和物理科学发现融合，将通过持续研究为地球带来效益。从新版报告可以看到，技术开发与验证应用领域已经成国际空间站造福人类的重要领域。

当前，正利用空间站开展新型商业合作关系。这使得空间站的运营从政府资助、承包商提供产品和服务的方式转向商业供应、政府作为用户的方式。寻求近地轨道商业市场的目的如下：一是鼓励全新的市场；二是吸引新的投资者参与航天活动并产生经济效益；三是确保强大的工业水平不仅用于未来的航天任务，还可用于许多相关产业；四是也是最重要的，使得各种思想、方法、优秀实践相互融合，成为经济开发的基石。

三、 启示

(一) 技术开发与验证应用管理流程清晰

国际空间站上每个有效载荷硬件的研制时间各不相同，短则几天，长则数年。美国国家航空航天局根据载荷开发的时间，针对不同阶段的组织管理各有侧重，分为发布研究公告阶段、战略规划阶段、战术阶段、实施阶段和运行阶段等 5 个阶段。技术开

发与验证领域也是如此。这种工作要求和管理工作科学透明，规划长远，细节清晰，重点突出，确保了空间站上的科研工作从获得资助、项目遴选直到研究计划实施和总结等每个环节都得以高效落实。

(二) 技术开发与验证应用领域目标明确

支持近地轨道以远的探索任务是技术开发与验证应用领域的重要目标。当前，以美国为主的载人航天国家正在实施月球、小行星、拉格朗日点等多目的地探测策略，火星作为可预见的终极目标。为实现这一目标，谋划实施路径开发探索系统，充分利用空间站开展技术开发与验证。

当前，验证卫星在轨服务、发展机器人技术等成为应用重点。在轨服务技术方面。国际空间站运行至今接受了大量的在轨维护、模块更换等操作，是验证、发展在轨服务技术的极佳平台。在机器人技术方面。在当前的载人近地探索中，很多任务都是人与机器人系统协同完成的。在未来的载人月球、火星和其他目的地的任务中，人类与机器人系统进一步协同探索的方式既是需要也是必然趋势，应用范围也将更加广泛。

(三) 商业合作方式为技术开发与验证应用带来更大发展空间

当前，正在利用国际空间站作为开辟低地球轨道新市场的踏石而大力发展。商业合作伙伴可以提供想法、流程和技术，营造一种更加友好的商业氛围。这种方式可以鼓励新的市场、技术开发并产生经济效益，并为商业伙伴参与低地球轨道以远的活动打下基础。开展新型商业合作关系，使得空间站的运营从政府资助、承包商提供产品和服务的方式转向商业供应、政府作为用户的方式。在空间站应用开发上，已将国际空间站的美国舱段定位为国家实验室，向美国国家航空航天局以外的其他政府机构、非营利机构和私营企业开放，通过空间科学促进中心管理国家实验室。

与商业公司通过签署空间法案协议，达成合作协议。通过这种模式，私营公司开发了市场，建造了硬件，而美国纳税人提供了美国国家实验室的基础设施和基金。产生的效益包括成本透明、低成本完成任务、到达空间、加速市场化进程、国际合作和创新思路等。

(北京空间科技信息研究所)