

## 2016 年国外载人航天器发展综述

2016 年，国外共计开展 12 次载人航天任务，成功 11 次，失败 1 次。其中 4 次载人飞船发射任务，8 次货运飞船发射任，发射次数较 2015 年的 14 次略有降低。俄罗斯发射 4 艘“联盟”载人飞船和 3 艘“进步”货运飞船，其中进步 MS-4 飞船任务失败，是俄罗斯近一年半以来发生的首次航天事故；美国商业公司成功发射 4 艘货运飞船；日本成功发射 1 艘货运飞船，即第 6 艘 H-2 转移飞行器 (HTV-6)。

2016 年，载人航天领域发展较为平稳。重点围绕低地球轨道开展空间应用，同时积极推进低地球轨道以远的系统建设，以载人火星为长远目标持续推进。任务执行上，美、俄围绕国际空间站 (ISS) 开展运营维护。美国仍然依靠商业公司的“龙”、“天鹅座”飞船开展货物运输；俄罗斯载人飞船再升级，“联盟”MS-1 首飞成功，“联盟”U 火箭再遇发射失利，“进步”MS-04 飞船损毁。系统建设和技术研发上，美国持续推进以“猎户座”飞船和“空间发射系统”为主的探索系统开发，受预算影响，小行星计划面临推迟；俄罗斯新一代载人飞船“联邦”号完成纸面设计，进入制造阶段，东方发射场完成首次发射，计划 2023—2025 年间进行首次载人发射，2030 年起开展月球探索任务。空间应用方面，重点围绕国际空间站这一在轨平台开展技术开发与验证试验。商业化发展方面，近地轨道商业运输稳步推进，商业公司进军太空旅游和开发，美国国家航空航天局 (NASA) 不断开拓新型商业合作伙伴关系。NASA 授出第二轮商业补给服务 (CRS-2) 合同，

SpaceX、轨道 ATK 和内华达山脉公司(SNC)获胜, 将从 2019 年起分别用“龙”飞船、“天鹅座”飞船和“追梦者”号航天飞机为国际空间站提供货物补给; 波音公司、SpaceX 公司有望于 2017—2018 年实现低地球轨道商业乘员运输; 毕格罗宇航公司研制的“毕格罗”可扩展活动舱(BEAM)在轨成功展开, 成为全球首个与国际空间站对接并成功展开的充气式活动太空舱; 太空旅游呈现重大进展, 维珍银河公司成功进行了第二艘“太空船”2 号首次无动力滑翔飞行试验; 此外, 洛·马、轨道 ATK、联合发射联盟、SpaceX 等诸多商业公司提出地月空间及载人火星探索规划。

## 一、各国围绕国际空间站积极开展空间活动

### (一) 俄罗斯发射新型“联盟”MS 载人飞船

“联盟”MS 是俄罗斯“联盟”系列载人飞船的最新一代型号, 继承了“联盟”TMA-M 飞船的设计, 同时也将成为“联盟”系列的最后一代飞船, 之后俄罗斯将启用新一代载人飞船“联邦”号(Federation)。据称, “联盟”MS 与“进步”MS 构造的大部分技术方案将用于俄罗斯新一代载人运输飞船的研制。截至 2016 年 12 月 31 日, 共有三艘“联盟”MS 飞船成功发射, 并与国际空间站对接。

自 20 世纪 60 年代以来, 该系列飞船就在外观设计上保持了一致性。但在飞船内部, “联盟”MS 型号则进行了众多明显改动, 包括将乌克兰制造的量子-B(Kvant-B)无线电通信系统替换为统一指令遥测系统, 结束了俄罗斯对乌克兰天线、馈线和通信电子设备产品的依赖; 新的遥测指令系统能够使用“射线”(Luch)对地静止通信卫星向地面中继遥测数据并接受中继指令。有了新的通信系统, “联盟”飞船能在 70% 在轨时间内保持与地面的联系。

MS 型飞船的一个通信升级是安装启用了邻近通信链路, 与空间站交会过程中可建立连接实现相对导航, 作为飞船导航数据的

额外来源。“联盟”MS-1 配置了 GPS 和“格洛纳斯”接收器，用于准确测时、状态向量计算和轨道确定，不再依赖于仅在经过地面站时才能使用的雷达跟踪，之前雷达跟踪只能在通过地面站时进行。MS 型还安装了改进型摄像系统并采用数字视频传输向空间站和地面传送更佳画质的画面。MS 型采用数字电视系统取代了模拟电视系统(Klyost)，使视频能够作为数据流的一部分通过天对天通信链路传输。对飞行控制系统、车载软件和通信系统的改进也将推动从模拟向数字视频传输的转换。

“航向”(Kurs)导航系统在最新一代的“联盟”号飞船上有了重大的改进，飞船交会对接设备将升级为使用俄罗斯国产现代化电子元器件的“航向”NA(Kurs-NA)系统。“航向”系统是基于无线电的系统，可以保证航天器能够完全实现自主交会、最终逼近和对接序列。“航向”系统使用由目标飞行器发送到追踪飞行器天线的信号来确定其视线角和始于距离 200 千米的远交会节面角，航向、视线角度线及近交会的距离和距离变化率。“航向”NA 使得乌克兰制造的组件从系统中彻底清除，而为飞船提供了整体质量更轻，系统能力更强的组件。“航向”NA 只需要一根天线，即可以为“联盟”MS 飞船提供更精准的测量，使其与国际空间站完全自主对接。

“联盟”MS 飞船上的升级版信息记录系统 SZI-M 是完全俄罗斯国产电子产品，该系统安装在返回舱飞行座椅下，扮演“黑匣子”角色，负责收集和存储大量的飞行数据，包括技术信息、乘员的生理参数及在返回和着陆过程中的语音通信。

此外，飞船太阳能电池板的有效面积增加了 1.1 平方米，使电源系统效率提高 25%，同时增加了第五个蓄电池组以提供额外电力储能能力；推进系统将小推力的定位推力器替换为 130 牛的发动机，让飞船外部的推力器能得以重新布置，将所有发动机成对安装，使系统更具鲁棒性，现在能容许两台推力器同时故障的

情况；轨道舱加装了碎片防护层，对接机构内加入了备份驱动机构。

“联盟”MS 还采用了新型数字式备份环路控制器(BURK)；飞船姿态控制系统采用了新型速率传感器(BDUS-3A)；新型 LED 前灯可在对接序列过程中提供照明。

## (二) 俄罗斯新型货船“进步”MS-4 发射失败

2016 年，俄罗斯共发射了三艘“进步”MS 货运飞船，其中“进步”MS-4 货运飞船发射失败。这是俄罗斯一年半以来首次重大航天事故。初步掌握的资料显示，本次事故将使俄罗斯联邦航天局损失超过 40 亿卢布(约合 6300 万美元)。目前在没有货物到达的情况下，国际空间站内的必备物品储备足以用到 2017 年 3 月，水和食物等关键物资可维持到 2017 年 6 月初。

“进步”MS 飞船在“进步”M-M 飞船的基础上，使用了数字航空电子设备。MS 型飞船使用新的“航向”NA 交会系统替代了原来的 Kurs-A 交会系统，以提高对接过程的可靠性和安全性；并用 AO-753A 型天线替代 2AO-VKA 和 AKR-VKA 型天线，保留了原来的 2ASF-M-VKA 天线；新的 SUD 飞行控制系统可通过“格洛纳斯”导航卫星自主测量交会轨迹，无需再通过地面站进行测量；通信系统使用 EKTS 无线电指令系统取代了老的量子-B 系统，从而能够通过“射线”数据中继卫星实现飞船与俄罗斯地面站的实时联络，使地面站既可通过“射线”卫星也可直接向飞船发送命令并接收遥测数据；还增加了流星防护系统、闪电防护系统、新的 SFOK 发光二极管照明系统、改进的 BDUS-3A 型角速度传感器；对接口增加了备用电动驱动机构；采用新的数字电视系统取代了旧的 Klest 模拟电视，飞船和空间站可通过船上无线电频道联络。另外，从第三艘“联盟”MS 飞船开始，可选装立方体卫星释放装置。

### (三) 日本发射一艘 H-2 转移飞行器

2016 年 12 月 9 日, JAXA 使用三菱重工的 H-2B 火箭在种子岛航天中心成功将第六艘 H-2 转移飞行器(HTV-6)送入预定轨道。HTV-6 除了向国际空间站运送饮用水、食物、日用品等补给物资外,还搭载了 7 颗由大学及民间企业开发的超小型卫星、日本生产的锂离子电池组成的作为空间站电源的新型电池等总计约 5.9 吨的物质。飞船于 12 月 13 日与国际空间站交会,站上日本航天员操作机械臂夹持 HTV-6 完成停靠、对接。由于欧洲自动转移飞行器(ATV)已退役,目前负责给国际空间站运送物资的国家仅剩美国、俄罗斯和日本,而 HTV 已成为目前运力最大的空间站货运飞船。

日本 HTV-6 飞船携带长 700 米的电动绳系测试系统“白鹤号集成绳系实验”(KITE)抵达国际空间站后,开始测试用于部署绳系的机构。电动绳系系统可用于清除空间碎片。该系统方案在 2014 年首次提出,包括一个 700 米长的电动绳、用于部署电动绳并引导与空间碎片连接的航天器,以及将碎片拖至大气层焚毁的操作航天器。电动绳由铝和不锈钢缆线通过渔网公司的编制技术制成,在通电后,通过切割地球磁场产生动力,进而改变与飞船的相对位置,朝向空间碎片运动。目前测试用的绳长 700 米,最终将采用 5000~10 000 米长的绳。电动绳系系统有望在 2025 年左右正式部署,用于清除数百千克至数吨重的大型空间碎片。

### (四) 技术试验成为国际空间站应用重点

2016 年 5 月, JAXA 与菲律宾联合研制的“迪瓦塔”-1(DIWATA-1)微卫星成功释放,该卫星是菲律宾研制的首颗微卫星,也是 JAXA 首次从国际空间站的“希望”号实验舱上部署 50 千克级微卫星。6 月, NASA 在国际空间站上建立了可行的“延迟/中断容忍网络”(DTN)服务,在创建“太阳系互联网”方面迈出关键一步。8 月, NASA 航天员凯特·鲁宾斯在国际空间站内成功完成微重力

条件下的 DNA 测序，这标志着人类已迎来“能对太空活体生物进行基因测序”的全新时代。

## 二、商业载人航天发展持续推进

美国对商业公司的培育推动发射服务业和航天器制造业的进一步发展，形成了载人航天服务市场，有助于航天产业化和国家经济发展。近年来，NASA 推行商业航天的意志愈加坚决，涉及领域从近地空间拓展到深空。2016 年，美国继续加大力度，推动商业载人航天的发展。

### （一）“龙”飞船复飞，充气验证舱段成功展开

2016 年 4 月 9 日，“猎鹰”9-1.2 全推力型火箭从卡纳维拉尔角空军基地 SLC-40 发射台发射，成功将 SpaceX 公司的“龙”货运飞船送入轨道，执行该公司第 8 次商业补给服务(CRS-8)任务。这是继 2015 年 6 月第 7 次任务发射失败后，SpaceX 公司发射的首次国际空间站货运补给任务。随“龙”飞船进入太空的还有存放在货舱中的 BEAM，抵站后进行在轨充气部署，进行居住技术验证试验。与此同时，火箭第一级在与第二级分离之后，受控返回位于海上的移动回收平台并首次成功实施垂直软着陆。对于 SpaceX 公司来说，此次任务是“龙”飞船时隔一年后首次到访国际空间站。

此次任务中，“龙”飞船共携带了 3136 千克的关键补给品和有效载荷，其中，最大的有效载荷是毕格罗宇航公司建造的充气式验证舱段，质量约 1413 千克。BEAM 是一个充气式居住技术验证舱段。可扩展式住所能极大降低未来航天任务的运输体积。“扩展式”住所质量很轻，所需的运载火箭有效载荷体积较少，但在空间中展开后可以为航天员提供舒适的生活和工作区域。同时，具有一定的抵抗太阳和宇宙射线辐射、空间碎片、原子氧、紫外线辐射和其他空间环境因素的能力。20 世纪 90 年代末，NASA 取

消了在研的中转居住舱项目，之后，毕格罗宇航公司根据一份“空间行动协议”得到了这项多层可扩展舱段技术概念方案的许可。NASA 从 2010 年开始评估在国际空间站上添加充气式舱段的可能性并与毕格罗宇航公司进行了多次讨论，最终在 2012 年 12 月签订了价值 1780 万美元的 BEAM 合同。BEAM 项目由 NASA “先进探索系统”计划资助，BEAM 验证试验支撑了该计划为地球轨道以远的载人任务开发深空住所的目标。毕格罗宇航公司在 NASA 的中转居住舱方案基础上改进了舱段使用的轻量、紧凑材料，即获得专利的维克特拉防护织物，强度为凯夫拉尔纤维的两倍。充气后，BEAM 直径增加到 3.23 米，内部空间可达 16 立方米。舱体装备有发电量 1000 瓦的太阳能电池板，用于轨道和位置确定的 GPS 系统，用于姿态确定的磁强计和太阳敏感器，以及用于姿态控制的磁转矩仪。舱内采用被动热控方式，将平均温度保持在 26℃。在接下来的两年测试期内，空间站乘员和地面工程师将收集 BEAM 性能数据，包括结构完整性和漏气率。BEAM 内嵌入的各种仪器也将提供重要数据来源，包括相较于传统铝制舱段的辐射和温度变化等。航天员定期(每年 4 次，每次几个小时)进入舱内收集数据并进行检测。测试期结束后，该舱段将与空间站脱离，再入大气层烧毁。

此外，7 月 18 日，SpaceX 公司在卡纳维拉尔角空军基地用“猎鹰”9 全推力型火箭向国际空间站发射“龙”飞船，执行其第 9 次 CRS 任务。这艘“龙”飞船携带了 2220 千克有效载荷，包括波音公司建造的第二台国际对接转接器(IDA)，第一台在 2015 年 6 月的发射爆炸事故中损毁。

## **(二) 轨道 ATK 公司“天鹅座”飞船成功执行两次任务**

3 月 23 日，美国轨道 ATK 公司的“天鹅座”飞船在佛罗里达州卡纳维拉尔角空军基地发射升空，这是“天鹅座”飞船第五次为

国际空间站运送货物。飞船带有 3.5 吨货物，包括航天员补给物资和一些实验设备，其中还有一个升级版 3D 打印机。经过约 3 天的飞行，飞船于 26 日抵达国际空间站，两个月后，飞船携带近 1.5 吨垃圾返回地球。与以往任务不同的是，本次飞船脱离空间站后，地面控制人员遥控在飞船上进行了“飞船火焰实验”，该实验有助于了解微重力环境对火情扩散蔓延的影响，以便研制更好的防火材料和技术。

2016 年 10 月 17 日，美国轨道 ATK 公司的“天鹅座”飞船第六次为国际空间站执行货物运输任务，其运载火箭是继 2014 年上一次发射升空数秒后爆炸事故以来首次执行任务的“安塔瑞斯”火箭。

### **(三) SpaceX、轨道 ATK、内华达山脉和蓝色起源公司均获得商业合同**

2016 年 1 月，NASA 宣布第二轮商业补给服务(CRS-2)竞争的获胜者，SpaceX、轨道 ATK 和内华达山脉公司均获合同，将从 2019 年起分别用“龙”飞船、“天鹅座”飞船和“追梦者”号航天飞机为国际空间站提供货物补给。根据各家公司选用的航天器/运载火箭组合，初期 CRS-2 任务将向国际空间站运送 22500~26500 千克补给品和设备。之后，NASA 可能会视国际空间站运行情况追加 2021—2024 年的补给任务。其中“追梦者”号航天飞机首次飞行计划于 2019 年进行，将由“宇宙神”5 火箭发射。

继 SpaceX 和轨道 ATK 公司在第一轮商业补给服务(CRS-1)取得成功之后，NASA 就已正式开始第二轮合同授予的程序。原计划 2015 年初宣布合同授予结果，后一再推迟到 2016 年初。此外，NASA 又相继增加了 SpaceX 公司和轨道 ATK 公司在第一轮 CRS 阶段的任务次数，确保第二轮任务开始之前的货物补给工作。

虽然 NASA 未将内华达山脉公司列入其商业乘员项目的合作伙伴，但一直向内华达山脉公司的“追梦者”号航天飞机试验项目



给予投资，并将其列为“可合作的”空间运输合作伙伴。7月11日，内华达山脉公司宣布完成国际空间站第二轮商业补给服务合同项目下的首个里程碑事件——NASA批准了“追梦者”号航天飞机的设计、开发、测试和评价综合计划。

2016年6月19日，美国蓝色起源公司再次发射“新谢泼德”号亚轨道飞行器，其推进模块连续第四次实现了动力控制下的地面着陆，同时飞行器的乘员舱也试验了其降落伞系统。NASA于6月2日宣布授予蓝色起源公司一份亚轨道研究飞行任务合同。

### 三、积极推进新型载人航天器系统发展

#### (一) 持续推进“猎户座”多用途乘员飞行器(MPCV)

“猎户座”计划原是NASA“星座”计划中的关键组成部分，但2010年初，遇到资金短缺、进度滞后、设计思路分歧等困难，后随“星座”计划中止而重新调整。目前成为NASA实现重返深空载人探索目标的中流砥柱，将来用于载人登陆月球、小行星乃至火星的计划，同时也能支持国际空间站乘员运输、货物补给等近地轨道任务或自由在轨飞行，还可用作紧急逃生飞船。

2016年3月，NASA官方决定将小行星重定向计划(ARM)机器人任务的发射日期推迟一年至2021年底。在NASA咨询委员会的载人探索与运行委员会的会议上，ARM项目主管米歇尔·盖茨称，ARM机器人任务推迟旨在开展航天器平台的先期设计研究工作。NASA副局长威廉·格斯登梅尔表示，推迟发射与项目技术无关，而是资金出现困难。综合考虑一些意外因素，“猎户座”飞船执行载人任务的发射时间将推迟到2026年12月。

尽管“猎户座”在一个关键节点上出现了延迟，但本年度飞船的研制工作仍持续推进。据肯尼迪航天中心2016年8月《航天港》报道，NASA技术人员与承包商从7月开始在尼尔·阿姆斯特朗操作与检测厂房的高跨区内进行“猎户座”飞船热防护系统(TPS)

隔热瓦的黏合。

NASA 采用了与航天飞机轨道器类似的隔热瓦，将其黏合到防护板上。“猎户座”飞船需要约 1300 块隔热瓦，尺寸一般为 20.32 厘米 × 20.32 厘米，大多数为标准尺寸，编号相同尺寸相同，而某些用于舱窗、推进器和天线上的隔热瓦则是特制的。技术人员将航天飞机项目后期所研制的一种更坚固型涂料——坚韧型独特纤维隔热材料(TUFI)应用于“猎户座”飞船的隔热瓦上。这些性能更高的隔热瓦将能有效地减少地面操作和轨道碎片对飞船产生的损伤。

“猎户座”飞船的主承包商洛克希德·马丁公司提供了用于确定隔热瓦尺寸和形状的相关数字化计算机辅助设计信息。EM-1 任务中的“猎户座”飞船后壳防护板的外观不同于 2014 年 12 月 5 日首次试验飞行任务(EFT-1)：EFT-1 的乘员舱外观为黑色，而 EM-1 的乘员舱隔热瓦使用了镀铝涂层，外观为闪亮的银色。

安装 TPS 隔热瓦是实施每次发射飞行任务前准备工作的一部分。虽然隔热瓦具有防水功能，但由于“猎户座”飞船降落在海域，且在飞船返回地球时会对防水材料产生烧蚀，因而飞船在海域降落后会吸收盐水并增加污染物，导致隔热瓦无法再次使用，所以在每次任务结束后需对隔热瓦进行更换。隔热瓦的黏合工作将持续数月，共有 7~8 名技术人员和 2 名质量检查员一起开展该项工作。在完成隔热瓦的黏合后，技术人员将 9 个防护板和前舱罩安装到已与服务舱对接组装的乘员舱上。

## (二) 俄罗斯新载人飞船“联邦”号持续推进研制工作

2016 年 1 月 15 日，俄罗斯公布了其正在研制的新一代载人飞船的名字：“联邦”号。2015 年 8 月开始为新飞船对外征名，最后从十个候选名单中脱颖而出。俄罗斯新一代载人飞船“联邦”号放弃了目前“联盟”号飞船的三舱段结构设计，采用全新的两舱段设计，整体设计外观与美国正在研制的“猎户座”飞船相似。飞船计

划由正在研制的“安加拉”A5 运载火箭发射，将取代目前的“联盟”号飞船执行近地轨道任务，未来还可用于执行载人登月任务。

“联邦”号飞船较“联盟”号飞船进行了大量的改进，其内部空间是“联盟”号飞船的两倍大，可搭乘 4 名航天员和 500 千克货物。返回着陆前，飞船将伸出 4 个装有减震器的支架，使飞船不会有强烈的撞击感。俄罗斯能源火箭航天集团(RSC Energia)总经理罗伯塔于 10 月 11 日披露了“联邦”号飞船的技术细节，特别是研制的新飞船将采用降落伞和喷气式着陆系统相结合的方式，从而使着陆精度提升至 5 千米以内。

## 五、结语

2016 年是世界载人航天 55 周年，也是载人航天密集发射、迅速发展的一年。主要航天大国仍将载人航天作为国家重要战略而持续投入，低地轨道载人航天技术发展成熟，各国围绕国际空间站开展全面应用，面向低地轨道以远的月球、小行星、火星等目标探索的相关先进技术、系统研发持续推进。美国以保持和巩固全球领导地位为目标，以能力提升为技术，以技术创新为手段，积极探索商业化运营模式，将初步成熟的近低轨道载人航天活动推向市场，积极调动商业力量服务载人航天发展；俄罗斯为巩固载人航天的优势地位，明确载人航天长远发展思路和重点，包括继续运营空间站，研制新一代载人飞船、实施载人登月项目，并提出国际月球轨道站构想；欧洲和日本通过国际合作开展载人航天活动；印度组建了航天员中心，积极为开展载人航天活动做准备。

(北京空间科技信息研究所)