

2020 世界载人航天发展报告

中国载人航天工程办公室 编

中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

2020 世界载人航天发展报告 / 中国载人航天工程办公室编. —北京: 中国原子能出版社, 2021.10
ISBN 978-7-5221-1642-6

I. ①2… II. ①中… III. ①载人航天—研究报告—世界—2020 IV. ①V4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 206735 号

内 容 简 介

本书在全面跟踪 2020 年世界载人航天活动及技术发展的基础上, 以独特的视角展现了主要国家载人航天领域的发展动态与趋势。本书首先介绍了中国载人航天工程 2020 年进展情况, 其次从载人运载火箭、飞船、航天员、空间应用及发射场等领域, 对国外载人航天国家 2020 年发展情况进行了概述, 最后针对载人龙飞船首飞等热点、重点问题进行了专题分析。本书力求覆盖 2020 年世界载人航天领域发展全貌, 内容具体全面, 分析深入浅出, 适合本领域工程管理人员、相关专业工程技术人员和航天爱好者阅读。

2020 世界载人航天发展报告

出版发行 中国原子能出版社 (北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 王 青 郭文传

装帧设计 侯怡璇

责任校对 宋 巍

责任印制 赵 明

印 刷 北京厚诚则铭印刷科技有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 13.5 彩页 5 页

字 数 224 千字

版 次 2021 年 10 月第 1 版 2021 年 10 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5221-1642-6 定 价 128.00 元

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

《2020 世界载人航天发展报告》

编 审 组

主任委员 郝 淳
副主任委员 林西强 季启明 陈 杰 闫西海
李杏军
委 员 (按姓氏音序排列)
才满瑞 郭 凯 冷伏海 李向阳
田 莉 王功波 周 鹏

编 辑 部

主 编 廖小刚
副主编 赵 晨 强 静 杨 帆 曲 晶
何慧东
编 辑 张羽丰 张明月 刘伟雪 胡雅芸
聂永喜 吴 倩 陈 培 李彩军
赵 霄 郭文旭 孙 琴

《2020 世界载人航天发展报告》

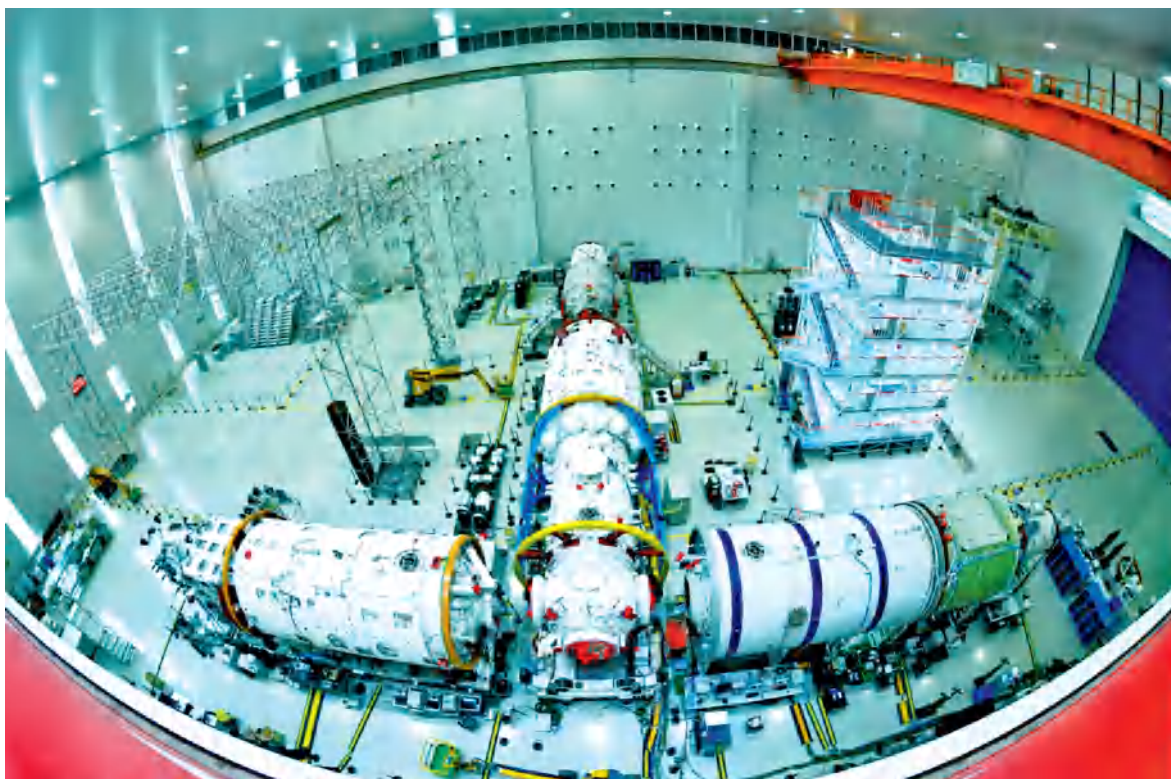
撰 稿 人

(按姓氏音序排列)

陈银娣	慈元卓	范唯唯	方 勇
管春磊	韩 淋	何慧东	胡畔畔
康金兰	廖小刚	刘朝霞	龙雪丹
强 静	曲 晶	王海名	王 帅
王 霄	王岩松	王 宇	肖建军
肖武平	杨 帆	杨 开	苑方磊
苑 艺	张 峰	张 杰	张绿云
张 蕊	张召才	张扬眉	赵 晨
郑惠文	钟江山	周生东	



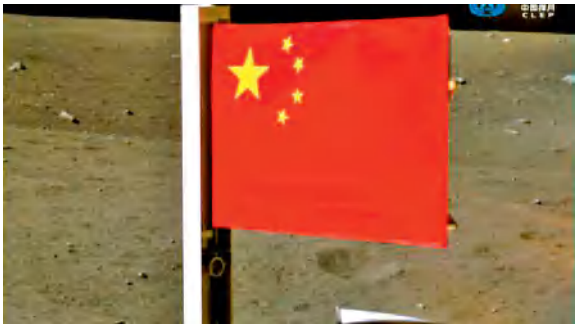
2020年5月5日，为我国载人空间站工程研制的长征五号B运载火箭，搭载新一代载人飞船试验船和柔性充气式货物返回舱试验舱，在我国文昌航天发射场成功点火升空；5月8日，新一代载人飞船试验船返回舱在东风着陆场预定区域成功着陆，试验取得圆满成功。



我国空间站基本框架由核心舱和两个实验舱在轨组装构成，额定乘员3人，乘员轮换期间短期可达6人，设计寿命不小于10年，具备通过维修延长使用寿命的能力，具备一定扩展能力。图为空间站三舱与对接的飞船开展大系统地面联试。



2020年7月23日,我国在文昌航天发射场用长征五号遥四运载火箭将我国首次火星探测任务“天问一号”探测器发射升空;探测器飞行约7个月后进入环火轨道,并择机开展着陆、巡视等任务,进行火星科学探测开启火星探测之旅,迈出了我国自主开展行星探测的第一步。



2020年11月,我国在文昌航天发射场,用长征五号遥五运载火箭发射嫦娥五号探测器;12月1日,嫦娥五号探测器降落在月球正面并开展采样工作;12月17日,携带1731克月球样品的嫦娥五号返回器在内蒙古四子王旗预定区域成功返回,首次实现了我国地外天体采样返回,中国探月工程“绕、落、回”三步走规划如期完成。



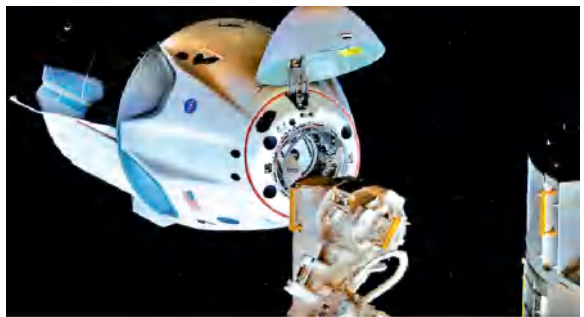
2020年是航天员进驻国际空间站20周年。截至2020年12月，共有251人次航天员到访国际空间站，开展了约3000项科学实验，为无数的科学发现提供了独特的研究机遇并取得历史性的突破。不仅有助于探索更远的太空，也有利于造福地球上的人类。



2020年4月、9月，NASA分别发布《NASA月球持续探索和开发计划》与《阿尔忒弥斯计划——NASA月球开发计划概述》文件，详细描绘了“阿尔忒弥斯”计划建设的具体思路、关键系统、重要技术与经费预算等。提出在实现登月之后未来还将在月球南极建立“阿尔忒弥斯大本营”，进行长期月球开发，并为人类登陆火星提供技术储备。



2020年4月，俄罗斯联盟2-1a火箭执行首次载人发射任务，成功将3名航天员送上国际空间站。此前的联盟系列载人飞船发射任务均由联盟-FG火箭执行，联盟-FG火箭于2019年退役后，联盟2-1a火箭曾执行一次无人的载人发射任务作为验证。



2020年5月—8月，美国SpaceX公司的载人龙飞船完成“演示-2”（Demo-2）首次商业载人航天飞行任务，标志美国商业乘员计划取得重要突破，首次实现利用商业载人航天系统运输航天员的里程碑。11月，载人龙飞船执行首次国际空间站商业乘员运输任务，将4名航天员送上国际空间站。



2020年10月，俄罗斯联盟MS-17飞船采用超快速对接模式与国际空间站对接，发射后仅用时3小时3分成功与国际空间站对接，创造联盟MS飞船与空间站的最短交会对接纪录。



2020年10月，美国与澳大利亚、加拿大、日本、卢森堡、意大利、英国和阿联酋等7个国家签署《阿尔忒弥斯协定》，希望为未来的月球资源开发、解决可能出现的月球活动争议提供国际标准。11月，乌克兰宣布加入该协定。

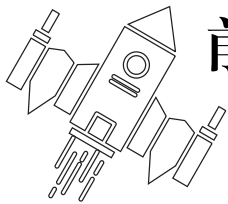


2020年7月，NASA的“火星2020”任务发射，预计将于2021年2月降落在火星表面，进行为期至少一个火星年（约687个地球日）的火星表面探索。



2020年10月，NASA的奥西里斯-雷克斯探测器（左图）对贝努小行星进行采样，采集到约60克的样品。该探测器将于2023年9月回到地球，样品用于研究太阳系早期情况以及地球生命来源等。

2020年12月，日本隼鸟2号小行星探测器（右图）将2019年在龙宫小行星采样的样品送回地球，帮助用于太阳系演化和生命起源的研究。



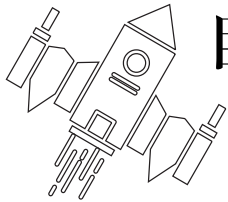
前言

2020年，中国载人航天工程全面转入空间站建造阶段。5月，中国长征五号B火箭首次飞行任务取得圆满成功，拉开了中国空间站在轨建造阶段飞行任务的序幕，为后续空间站核心舱、实验舱发射奠定了坚实基础；10月，中国第三批预备航天员选拔工作顺利完成，共有18名预备航天员（含1名女性）入选，他们将成为中国航天员队伍的新成员。目前空间站研制建设快速推进，空间站天和核心舱、天舟二号货运飞船、空间应用系统核心舱任务产品分别顺利通过出厂评审。2021年与2022年，中国载人航天工程预计实施包括空间站核心舱、实验舱、载人飞船和货运飞船在内的11次发射任务，2022年前后完成空间站在轨建造，实现中国载人航天工程三步走发展战略第三步任务目标。

2020年，美俄等主要航天国家继续围绕近地轨道和月球积极开展载人航天活动。国际空间站实现航天员进驻20周年，在科学、技术、教育、太空经济发展、创新技术等领域作用更加明显。美国商业载人航天运输系统取得突破，再次拥有载人运输能力。新型运载火箭与飞船等系统进展遭遇疫情冲击，美国航天发射系统火箭测试一再拖延，欧洲“阿里安”-6火箭、日本H-3火箭首飞时间推迟，印度首次载人航天飞行任务将推迟一年进行。载人登月方面，美国不断细化“阿尔忒弥斯”登月计划，进一步明确实施途径与建设目标；俄罗斯加紧谋划未来20年载人航天发展，提出载人登月与月球开放等远期目标；欧洲、日本、加拿大等地区与国家积极参与美国的“阿尔忒弥斯”计划与《阿尔忒弥斯协定》，以美国为首的国际登月及月球开发联盟正在逐步形成。世界载人航天活动围绕登月已经进入快速发展期，彰显国家地位的载人航天得到更多重视。

为了密切关注和跟踪世界载人航天发展动向，把握世界载人航天发展趋势，中国载人航天工程办公室组织编撰了《2020 世界载人航天发展报告》。参与编撰的单位有：军事科学院军事科学信息研究中心、北京跟踪与通信技术研究所、中国航天员科研训练中心、北京特种工程设计研究院、中国科学院科技战略咨询研究院、北京航天长征科技信息研究所和北京空间科技信息研究所等，在此一并表示感谢！

中国载人航天工程办公室
2021 年 4 月



目 录

中国专栏

中国载人航天昂首步入新时代 / 3

综述篇

2020 年国外载人航天发展综述 / 9

2020 年国外载人航天运载器发展综述 / 18

2020 年国外载人航天器发展综述 / 26

2020 年国外航天员系统发展综述 / 36

2020 年国际空间站科学研究与应用发展综述 / 46

2020 年国外载人航天发射场发展综述 / 58

专题篇

美国 NASA 2021 财年载人航天预算与发展计划解析 / 69

俄罗斯载人探月计划进展综述 / 78

国外新型载人运载火箭技术特点及发展趋势分析 / 88

“超重-星船”运输系统及其未来影响简析 / 96

国外新型载人飞船技术特点及发展趋势分析 / 103

载人龙飞船典型飞行任务解析 / 114

国际空间站人体研究的最新成果 / 126

国际空间站空间生命科学发展态势和重点成果分析 / 136
NASA 载人飞船海域回收搜救方案及任务实践 / 147
NASA 近地网新型发射通信系统升级与任务应用 / 158

附录篇

大事记 / 171
美国 2020 版《国家航天政策》 / 182
美国太空政策指令-6——太空核动力与推进国家战略 / 187
美国国家航空航天局月球持续探索与开发计划 / 190
“阿尔忒弥斯”计划——美国月球开发项目概述 / 198

中国专栏



中国载人航天昂首步入新时代

2020年是历史上极不平凡的一年，是全面建成小康社会和“十三五”规划收官之年，也是中国载人航天工程空间站任务转入实施阶段的关键一年。这一年，面对突如其来的疫情，工程全线不畏艰难、逆行而上，圆满完成了长征五号 B 运载火箭首飞任务，迎来工程“第三步”发展战略实施的“开门红”。这一年，工程全线攻坚克难、奋勇拼搏，按计划完成了各项研制建设任务，为圆满完成空间站建造任务奠定坚实基础。

一、长征五号 B 运载火箭首战告捷

2020年2月5日，长征五号 B 遥一火箭运抵海南文昌航天发射场，与空间站舱段完成发射场合练后，于5月5日发射升空，将搭载载荷准确送入预定轨道，长征五号 B 运载火箭首次飞行任务取得圆满成功。之后，各载荷按计划开展了在轨试验，试验船返回舱顺利返回。长征五号 B 运载火箭首次飞行任务对我国发射空间站舱段的新一代大型运载火箭进行了全面考核，大幅提升了我国近地轨道空间进入能力，成功验证了我国新一代载人飞船系列关键技术，极大地鼓舞和提振了航天战线全体同志的精神士气，一举扭转我国航天发射的被动局面。



二、空间站研制建设扎实推进

根据飞行任务安排，空间站工程分为关键技术验证和建造 2 个阶段实施，其中关键技术验证阶段安排了长征五号 B 运载火箭首飞、天和核心舱、神舟飞船、天舟飞船等 6 次飞行任务；建造阶段安排了问天舱、梦天舱、神舟飞船、天舟飞船等 6 次飞行任务。

2020 年，在中央的坚强领导下，工程总体和各部门、各系统，周密计划、英勇战“疫”、团结拼搏，扎实推进空间站研制建设各项工作。截至 2021 年 3 月，天和舱完成整舱综合测试、三舱和五舱等大系统联试，以及力、热大型环境试验与出厂评审。天和舱已于 2021 年 1 月 31 日运抵文昌发射场，目前正在发射场进行测试，计划 2021 年 4 月发射。问天舱完成初样研制，转入正样研制，启动正样舱体总装。梦天舱完成初样研制阶段主要工作。承担核心舱发射任务的长征五号 B 遥二火箭完成全箭总装和出厂评审，已运抵文昌发射场，正在进行测试；遥三、遥四火箭正在按计划进行生产。

天舟二号货运飞船完成出厂测试并通过评审，已与天和舱同时运抵发射场。长征七号遥三火箭已完成出厂评审。后续货运飞船及火箭正在按计划进行组批生产。

神舟十二号及神舟十三号载人飞船已完成力、热试验，正在开展出厂前准备工作；长征二号 F 遥十二火箭和遥十三火箭已完成总装及出厂评审。后续载人飞船及火箭正在按计划进行组批生产。

航天员系统完成天舟二号上行的舱外航天服、乘员产品及生活物资研制，正在进行后续任务产品组批生产。完成了第三批预备航天员选拔，共有 18 名预备航天员（含 1 名女性）最终入选，包括 7 名航天驾驶员、7 名航天飞行工程师和 4 名载荷专家，在经过系统的训练后，将参加空间站运营阶段各次飞行任务。其中，航天驾驶员和航天飞行工程师主要负责直接操纵、管理航天器，以及开展相关技术试验；载荷专家主要负责空间科学实验载荷的在轨操作。

空间应用系统及航天医学领域，已完成天和舱任务产品正样研制并随天



和舱进场。空间应用系统及领域正在开展问天、梦天舱载荷初样研制。

文昌、酒泉发射场已完成相关项目研制、活动发射平台维修、推进剂保障设施改造。测控通信系统正在开展系统联调，飞控流程与实施方案编制。着陆场完成相关基础建设项目。

三、工程应用效益显著提升

“建站为应用”是中国载人航天的初心。为充分发挥空间站作为国家太空实验室的应用效益，激发应用创新活力，中国载人航天成立了空间科学与应用委员会，汇聚国内最顶尖的科学家与技术专家为空间站应用任务出谋划策，并于2020年9月和11月分别在粤港澳大湾区和北京大学成立中国空间站工程巡天望远镜科学中心。依托国内优势力量，我国空间站应用创新能力有望得到大幅提升。与此同时，中国载人航天多措并举服务国计民生，着力提升工程的综合效益。10月19日，中国载人航天工程办公室郝淳主任在参加第六届中国（国际）商业航天高峰论坛时指出，中国载人航天工程将按照积极开放、公平公正的原则，在空间站物资补给、应用载荷研制、微小卫星释放、太空商业旅游等领域加强布局规划，在商业化发展、国际合作以及科普教育等诸多综合性领域有所突破，真正把空间站打造成一个形式灵活、精彩纷呈的国家实验室。在此战略指导下，中国载人航天与云南省政府再次签署战略合作框架协议，持续围绕搭载育种、产业基地建设等方面开展合作；联合清华大学艺术博物馆成立了“太空艺术馆”，开展载人航天科普教育、文化传播、社会公益等活动，为工程增添了一张“文化名片”，架起了科技与生活、工程与社会的沟通桥梁；与联合国外空司合作完成首批9个空间应用项目合作协议审查和6份协议签署，组织与俄罗斯、德国、法国、意大利、巴基斯坦等国开展合作交流。中国载人航天的综合效益显著提升。

四、工程发展大有可为

2022年空间站建成后将全面转入为期10年以上应用与发展阶段，为确



2020 世界载人航天发展报告

保建造与应用两个阶段紧密衔接，中国载人航天工程办公室组织开展了空间站应用与发展工程实施方案深化论证，开展了应用任务项目规划与统筹、新一代近地载人运载火箭选型及发射场适应性分析等专题研究，在确保实现空间站作为国家级太空实验室应用目标的同时，着力在取得重大科学发现、实现载人运输系统升级换代、促进商业航天发展等方面有所突破。在打造空间站和持续运营的同时，围绕载人航天长远发展，中国将瞄准世界前沿科技，开展载人月球探测论证工作和关键技术攻关工作，继续提升载人航天能力，为载人探索地月空间奠定基础。

2021 年是庆祝建党一百周年和“十四五”规划开局起步之年，也是空间站建造关键之年。中国载人航天将大力弘扬“两弹一星”精神和载人航天精神，密切协作、稳扎稳打，坚决夺取空间站建造任务胜利，为建设航天强国、实现“两个一百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴的中国梦作出新的更大贡献。

综 述 篇



2020 年国外载人航天发展综述

2020 年，受到疫情波及，国外主要航天国家载人航天研制进展受到一定影响，但作为综合国力体现的载人航天依然受到各国重视，围绕近地轨道与月球开展的载人航天活动持续进行。美国与俄罗斯都在积极谋划载人登月计划，航天发射系统/猎户座飞船，叶尼塞火箭/雄鹰飞船稳步推进；欧洲、日本、加拿大等地区与国家积极参与美国的“阿尔忒弥斯”计划与《阿尔忒弥斯协定》，以美国为首的国际登月及月球开发联盟正在逐步形成。美国商业载人运输能力发展取得突破，成功实现首次商业载人航天飞行。作为有人进驻已达 20 年的国际空间站，促进深空载人探索技术与地球科学技术发展的作用更加明显。

一、战略与规划

2020 年，美国、俄罗斯、日本、欧洲等国家和组织，继续高度重视载人航天的发展，纷纷出台政策与规划，以载人登月为牵引加速各自载人航天能力的发展。

美国 2020 年通过颁布各项政策，积极规划美国未来深空探索与载人登月活动。时任美国总统特朗普 12 月签署新版《国家航天政策》，明确提出实现月球长期开发与载人登陆火星将作为美国航天发展的主要目标之一，并再次强调要在 2024 年实现载人重返月球、2028 年建立月球基地。NASA 于 4



2020 世界载人航天发展报告

月、9月、12月分别发布《NASA 月球持续探索和开发计划》《阿尔忒弥斯计划——NASA 月球开发计划概述》《阿尔忒弥斯-3 科学定义小组报告》3份文件，详细描绘了“阿尔忒弥斯”计划建设的具体思路、关键系统、重要技术与经费预算等，提出如果能够得到 280 亿美元的预算，将能在 2024 年实现载人登月；未来还将在月球南极建立“阿尔忒弥斯大本营”，进行长期月球开发，并为人类登陆火星提供技术储备。美国还于 10 月与澳大利亚、加拿大、日本、卢森堡、意大利、英国和阿联酋等 7 个国家签署《阿尔忒弥斯协定》，为未来的月球资源开发、解决可能出现的月球活动争议提供国际标准。通过上述政策与文件，美国进一步打牢载人登月及月球开发的政策、技术、经费以及国际合作的基础，将有力推动 2024 年载人登月目标的实现。但不可否认的是，由于拜登已经当选美国新一任总统，虽然其承诺将继续推进载人登月、月球开发及载人登火，但在实施路径与进度安排上可能会发生变化，美国能否在 2024 年实现载人登月还存在不确定性。

俄罗斯也十分重视载人航天及载人登月的发展。俄总统普京于 2020 年 4 月召开航天工作会议，再次强调航天是俄罗斯的优先发展方向，要继续保持载人航天方面的领先地位。作为“俄罗斯联邦 2030 年及以后国家政策基础”研究的一部分，俄罗斯国家航天集团 7 月授权能源火箭与航天集团公司，启动未来 20 年俄罗斯太空探索路线图的研究，9 月的初步研究确定出 2040 年前俄太空探索的三大目标：继续进行近地轨道开发、实施载人登月与进行月球开发。俄罗斯登月时间将在 21 世纪三十年代末期。

欧洲航天局 10 月与 NASA 正式签署“合作谅解备忘录”，双方将继续在“门户”月球轨道空间站开展合作，欧洲航天局将为“门户”提供 2 个舱段，作为回报将获得 3 次飞往“门户”空间站的机会。此外，欧洲有意发展独立的载人航天能力，目前正在进行可行性研究。意大利 9 月与美国签署合作意向书，未来将投资 12 亿美元用于支持 NASA 的“阿尔忒弥斯”计划。

日本 6 月对其未来 10 年的“日本太空基本计划”进行修订，提出未来日本将参与美国主导的月球“门户”空间站建设，为日本航天员争取登月的机会。随后，美国政府 7 月签署“共同宣言”，明确日本将负责参与“门户”居住舱的建造、“门户”的物资补给、月面数据共享等工作；作为回报，日



本航天员将于 2025—2030 年在美国帮助下实现首次登月。为此，日本文部科学省 2021 财年预算专门列支 800 亿日元（合 7.58 亿美元），用于为美国的载人登月任务开发关键设备，使日本宇宙航空研究开发机构的年度预算飙升至创纪录的 2 800 亿日元。

印度由于遭受疫情严重影响，其载人航天计划遭遇挫折，2020—2021 财年的预算被削减为申请的三分之一。印度空间研发组织于 12 月表示，其首次载人航天飞行任务将推迟一年进行。印度原计划在 2021 年 12 月实现首次载人飞行，目前正在加快研发载人型 GSLV-MK3 运载火箭和载人飞船。

国际空间探索协调小组于 8 月发布《全球探索路线图补充——月球表面探索场景更新》报告，在各国月球探索计划的基础上，提出了月球探索三阶段实施方案，许多内容与 NASA 的“阿尔忒弥斯”计划重合，同时列出了包括安全往返月球表面、月球原位资源开发等 12 项月球探索目标。

二、主要载人航天系统

（一）新型运载火箭研制遭遇延误

由于疫情原因，各国运载火箭的研制进度都受到不同程度的影响。美国航天发射系统（SLS）的芯级在 1 月运抵斯坦尼斯航天中心后，接连受到疫情与台风的影响，原定的 8 项测试任务只完成模态试验、航电设备试验、失效保护试验、主推进系统试验、推进矢量控制系统试验、发射倒计时试验等 6 项，最后两项试验——低温推进剂加注试验与发动机静态点火测试，从最初的年中推迟到 2021 年，SLS 的首飞也从 2021 年 4 月推迟到 2021 年 11 月。目前，除了芯级外，包括 2 台固体火箭助推器、上面级在内的其他航天发射系统火箭部件均已运抵肯尼迪航天中心。一旦芯级完成测试，也将运抵肯尼迪航天中心，进行最后的组装与测试以迎接首飞。

俄罗斯继续推进叶尼塞新型重型运载火箭与联盟-5 中型运载火箭的研制。叶尼塞重型火箭在 2019 年完成初始设计评审后，2020 年继续完善设计。新方案将采用加长的贮箱，单发推进剂从 395 吨增加到 520 吨，200 千米载



2020 世界载人航天发展报告

荷能力从 103 吨提高到 115 吨。俄罗斯政府在 2020—2021 年期间拨款 14.7 亿卢布，用于叶尼塞重型运载火箭的技术设计工作。此外，俄罗斯能源火箭与航天集团公司于 12 月完成联盟-5 火箭一子级 RD-171MV 发动机的首次全尺寸点火测试，为 2022 年的首飞做好准备。

日本与欧洲的新型火箭则由于疫情及技术原因，首飞时间从 2020 年推迟到 2021 年。日本 H-3 火箭在 2 月先后完成芯级 LE-9 发动机与 SRB-3 固体助推器的最终点火试验，原定于日本 2020 东京奥运会结束后首飞，但由于 LE-9 发动机的燃烧室和涡轮泵出现裂缝，不得不于 10 月宣布推迟到 2021 年首飞。欧洲阿里安-6 在 10 月完成 P120C 助推器的最后一次静态点火测试，但由于疫情原因，其首飞两度推迟，从最初的 2020 年最终推迟到 2022 年。

（二）新一代飞船进展顺利

美国猎户座飞船和俄罗斯雄鹰飞船 2020 年都取得进展。猎户座飞船 2 月完成飞船发射中止系统（LAS）姿控发动机的第三次也是最后一次试验，3 月在梅溪测试站完成热真空测试与电磁干扰测试，随后运抵肯尼迪航天中心，并通过 NASA 组织的系统验收评审和设计认证评审，表明该飞船能满足“阿尔忒弥斯-1”任务的飞行要求。随后，猎户座飞船将与 SLS 火箭进行对接组装，迎接 2021 年的“阿尔忒弥斯-1”任务。

俄罗斯雄鹰飞船 2020 年则不断完善设计并开始建造工作。雄鹰飞船 3 月重新设计了飞船的着陆系统，将原先设计的软着陆系统改为联盟飞船使用的旧硬着陆系统，并同时启动飞船原型和首飞飞船的建造工作。考虑到经费与技术原因，俄罗斯有意研发缩小版雄鹰飞船，用于执行近地飞行任务。新飞船重约 8 吨，只可容纳 3 名航天员，可由联盟-2B 或联盟-5 火箭发射。

（三）航天员规模不断扩大

为应对未来繁重的近地轨道任务与登月任务，美俄都在积极推进航天员招募与培训工作，不断扩大航天员的规模。NASA 于 1 月迎来了 11 名新晋航天员，使 NASA 航天员数量达到 48 名，这些新航天员是 NASA 公布“阿尔忒弥斯”计划后的首批新晋航天员，未来将可能执行国际空间站、探月以及



探火等任务；随后 NASA 于 3 月启动新一轮航天员招募工作，约 1.2 万人提出申请，选拔结果将于 2021 年公布，新的航天员将为未来的多项太空任务做准备，而不仅是“阿尔忒弥斯”登月计划。12 月，NASA 宣布选出 18 名航天员（9 名男性和 9 名女性）为执行“阿尔忒弥斯”登月任务进行训练；经过训练后，将从中选出执行首次载人登月任务的航天员。

俄罗斯在 2019 年启动第 18 次航天员招募工作之后，第一阶段的接收申请工作已于 2020 年 6 月结束，共接受近 2 000 份申请；随后开展第二阶段的面谈工作，遴选出 59 名申请人参加面试选拔，最终 2020 年底选拔出 4 名新航天员。

为实现 2021 年首次载人航天飞行，印度从空军选拔出 4 名候选航天员，于 1 月前往俄罗斯进行培训，内容包括体能、医学、模拟失重、紧急迫降等，培训将持续一年时间。

（四）美俄航天发射场建设步伐加快

美国肯尼迪航天中心用于保障“阿尔忒弥斯-1”任务的 39B 发射工位升级改造已全部完成，主要地面设施设备已基本就位，具备了提供有效保障的条件。NASA 探索地面系统（EGS）部继续联合各承包商开展 2021 年首飞前的各项前期准备，包括地面设施设备的运行与匹配测试、SLS 火箭和猎户座飞船的装配与测试等。

俄罗斯继续加快东方发射场建设，同时对现有的拜科努尔发射场进行现代化改造。安加拉系列运载火箭发射工位的发射台架于 6 月运往东方发射场，随后开始发射台架的安装，预计 2023 年实现安加拉-A5 火箭的首飞；俄罗斯还计划在东方发射场为联盟-5 和联盟-6 号运载火箭建造发射平台。俄罗斯与哈萨克斯坦于 7 月签署合同，拟在拜科努尔航天发射场的原天顶 M 火箭发射工位建造新的拜捷列克综合发射设施，以用于发射新一代联盟-5 运载火箭；俄罗斯将为此投资约 10 亿美元，主要用于运载火箭运输以及火箭上面级操作设施、航天器和返回运载器的改造，新发射工位计划 2022—2023 年间投入使用。



三、国际空间站

2020 年是航天员进驻国际空间站 20 周年，截至 2020 年 12 月，共有 251 人次航天员到访国际空间站，开展了约 3 000 项科学实验。

(一) 20 年科学研究成就显著

利用独特的微重力环境，国际空间站通过 20 年的科学研究任务，在科学、技术、教育、太空经济发展、创新技术等领域获得显著成效，先后完成阿尔法磁谱仪、冷原子实验室、啮齿类研究、双胞胎研究等著名实验，在基础疾病研究、发现稳定燃烧的冷火焰、新型水净化系统、利用蛋白质晶体开发药物、对抗肌肉萎缩和骨丢失、探索物质的第五种状态、促进近地轨道经济发展、在微重力环境下种植食物等 20 个方面取得了重大进步，极大地提高了人类的科学知识水平，改善人类的健康状况，促进了先进技术的发展。

2020 年，各国共向国际空间站发射 11 艘飞船，其中 4 次载人飞船任务（俄罗斯 2 次、美国 2 次），7 次货运任务（美国 4 次、俄罗斯 2 次、日本 1 次），运送 12 名航天员进驻国际空间站，先后开展了数百项科学实验任务，取得多项重大进展。

俄罗斯联盟 2-1a 火箭于 4 月执行首次载人发射任务，成功将 3 名航天员送上国际空间站。此前的联盟系列载人飞船发射任务均由联盟-FG 火箭执行，联盟-FG 火箭于 2019 年退役后，联盟 2-1a 火箭曾执行一次无人载人发射任务作为验证。10 月，俄罗斯联盟 MS-17 飞船采用超快速对接模式与国际空间站对接，发射后仅用时 3 小时 3 分成功与国际空间站对接，创造联盟 MS 飞船与空间站的最短交会对接时间纪录。

(二) 发生气体泄漏故障

2020 年 8 月，国际空间站出现气体泄漏现象；10 月，泄漏点被找到，导致气体泄漏的裂缝位于星辰号舱的过渡舱内，可能因外部撞击产生；11 月，航天员利用耐热的聚酰亚胺胶带对裂缝进行暂时密封，但随后发现有可能存



在新的裂缝，气体泄漏问题依然没有彻底解决。这表明国际空间站经过 20 多年的使用，其发生故障的概率不断上升。

（三）未来发展模式将更加多元

目前国际空间站按计划将只运行到 2024 年，国际空间站各合作方一方面考虑国际空间站继续延寿，另一方面积极谋划后续发展。对于国际空间站未来的发展，美国积极推进商业化进程，俄罗斯则考虑建立自己的空间站。NASA 于 1 月授予 Axiom 航天公司合同，为国际空间站研制商业舱段，新舱段将包括一个节点舱、研究与制造设施、乘员居住舱以及用于观测地球的“大窗户”舱体，预计 2024 年下半年发射首个舱段。12 月，NASA 向国际空间站发射纳米架公司的 Bishop 商业气闸舱，以加速国际空间站商业化的进程。俄罗斯则计划继续向国际空间站发射新的舱段，并在未来以新舱段为核心建造自己的空间站。俄罗斯国家航天集团表示，计划于 2021 年 4 月和 9 月向国际空间站发射科学号多功能舱和停泊号节点舱，以进一步扩大俄罗斯的轨道空间，以容纳更多航天员和实验设施。俄能源火箭与航天集团公司 11 月对外宣布，国际空间站寿命到期后，俄罗斯将基于科学号多功能舱组建自己的新型地球空间站，将由基础舱、实验舱、存储舱（仓库）、功能舱以及商业舱组成，总体积大于和平号空间站与国际空间站俄罗斯舱段，不仅可继续用于开展科学实验，还能开展商业化运营接待太空游客。俄罗斯 11 月表示，将在 2021 年与美国就国际空间站的未来命运开展讨论，最终结果将取决于国际空间站的技术条件与政治因素。

四、商业载人航天

美国商业载人运输能力在 2020 年取得重大突破，SpaceX 公司的载人型龙飞船完成 2 次载人航天飞行任务，成功将 6 名航天员送上国际空间站；商业公司从近地轨道向深空拓展，将承担“载人登陆系统”的研制，为实现载人登月提供帮助；SpaceX 公司下一代“超重-星船”星际运输系统稳步推进，将为未来商业登陆火星探索提供动力。



2020 世界载人航天发展报告

（一）近地轨道商业载人运输能力取得突破

美国 SpaceX 公司的载人龙飞船于 5 月—8 月完成“演示-2”（Demo-2）首次商业载人航天飞行任务，飞船总共在轨飞行近 64 天，将 2 名航天员送至国际空间站并顺利回收，标志美国商业乘员计划取得重要突破，实现利用商业火箭发射商业载人飞船、搭载航天员飞抵国际空间站并安全返回的里程碑。11 月，载人龙飞船执行首次国际空间站商业乘员运输任务，将 4 名航天员送上国际空间站，航天员将在轨开展为期约 6 个月的科学任务。上述两项任务，使美国恢复了自 2011 年航天飞机退役后的载人运输能力，并摆脱了对俄罗斯的长期依赖。此外，NASA 和波音公司于 7 月完成星际客船的“无人试验飞行任务”（OFT-1）故障评审，共提出 70 项改进建议。完成整改后，波音公司将于 2021 年进行第二次“无人试验飞行任务”。

（二）商业航天能力从近地轨道向深空拓展

基于近地轨道商业运输工作取得的成绩，NASA 将月球轨道的运输任务也交由商业公司完成。2020 年 3 月，NASA 将月球“门户”平台的首个后勤服务（GLS）合同授予 SpaceX 公司；整个 15 年计划的总价值为 70 亿美元，以后还可能包括其他公司。SpaceX 公司每次将至少 4.4 吨的货物运送到“门户”，并停靠 1 年为航天员提供更多的空间。为加速 2024 年登月计划的实施，NASA 将“载人着陆系统”也交由商业公司完成。此外，SpaceX 公司的星船原型机 SN8 完成 12 千米的试飞，为其顺利研制奠定基础。“超重-星船”采用船箭一体化设计，包括“超重”火箭级和星船飞船级，运载能力超过 100 吨，最早将于 2024 年实现首次载人火星飞行。

五、深空探索

随着美国“阿尔忒弥斯”计划的加速实施，“门户”空间站各模块加快建设，以火星、小行星等为目的的深空探测的热度持续升温。



（一）美国不断优化调整登月方案

为实现 2024 年载人登月，基于现有的技术与经费，NASA 积极调整其首次登月方案设计。NASA 于 3 月宣布放弃“门户”空间站作为中转用于 2024 年载人登月，以节约时间与经费集中保障高优先的登月任务。与此同时，NASA 充分利用美国的商业航天能力，加速推进“载人着陆系统”建设。4 月，NASA 宣布选定 SpaceX 公司、Dynetics 公司和蓝源公司进行“载人着陆系统”的设计论证与研制，最终选择两家公司执行 2024 年的载人登月任务；11 月，3 家公司的“载人着陆系统”的设计方案通过 NASA 的初始设计评审。同时，NASA 在 2021 财年预算中申请 32 亿美元用于“载人着陆系统”，以加快该系统的研制建设。

（二）无人深空探测热度不减

除月球外，各航天机构还针对火星、水星、木星等太阳系行星实施或启动无人探索项目。NASA 的“火星 2020”任务于 7 月发射，毅力号火星车于 2021 年 2 月降落在火星表面，进行为期至少一个火星年（约 687 个地球日）的火星表面探索。NASA 还在积极推动先进推进技术、充气式隔热罩、高科技火星太空服、火星漫游车、可持续动力系统、激光通信系统等 6 项关键技术的研发，为未来的载人火星任务奠定技术基础。作为阿联酋首个火星探测器，希望号火星探测器于 7 月发射升空，2021 年 1 月抵达火星轨道，运行时间为一个火星年，将探测火星大气的详细信息。

日本隼鸟 2 号小行星探测器在 2019 年完成龙宫小行星采样任务后，于 2020 年 12 月成功将样品送回地球，用于太阳系演化和生命起源的研究，是日本航天探索的里程碑式进步。NASA“奥西里斯-雷克斯”探测器 10 月对贝努小行星进行采样，采集到约 60 克的样品，该探测器将于 2023 年 9 月回到地球，样品用于研究太阳系早期情况以及地球生命来源等。

（军事科学院军事科学信息研究中心）

2020 年国外载人航天运载器发展综述

2020 年全球共执行 114 次航天发射，与载人航天相关的发射活动共 11 次（见表 1），与 2019 年持平，各项发射任务均获圆满成功。

表 1 2020 年载人航天活动发射情况

俄罗斯	联盟 2-1a	2020/4/9	联盟 MS-16 载人飞船	LEO	拜科努尔	成功
		2020/4/25	进步号 MS-14 货运飞船	LEO	拜科努尔	成功
		2020/7/23	进步号 MS-15 货运飞船	LEO	拜科努尔	成功
		2020/10/14	联盟 MS-17 载人飞船	LEO	拜科努尔	成功
美国	猎鹰 9	2020/3/8	货运龙飞船	LEO	卡纳维拉尔角	成功
		2020/5/31	载人龙飞船	LEO	卡纳维拉尔角	成功
		2020/11/16	载人龙飞船	LEO	卡纳维拉尔角	成功
		2020/12/7	货运龙飞船	LEO	卡纳维拉尔角	成功
	安塔瑞斯	2020/2/16	天鹅座飞船	LEO	沃勒普斯	成功
		2020/10/3	天鹅座飞船	LEO	沃勒普斯	成功
日本	H-2B	2020/5/21	HTV-9	LEO	种子岛	成功

一、任务执行情况

2020 年，国外围绕国际空间站项目共开展了 4 次载人飞行和 7 次载货飞行。参与上述任务的火箭包括：俄罗斯联盟 2-1a 火箭，美国猎鹰 9、安塔瑞



斯 230 火箭，以及日本 H-2B 火箭。

（一）联盟 2-1a 成功执行首次载人任务

2020 年 4 月 9 日，联盟 2-1a 火箭搭载联盟 MS-16 飞船由拜科努尔发射场发射升空，成功将飞船送入预定轨道。这是联盟 2-1a 火箭首次执行载人任务，该型火箭曾在 2019 年 8 月 22 日将未载人的联盟 MS-14 载人飞船送入预定轨道，以验证联盟 2-1a 发射载人飞船的安全性。

联盟 2-1a 为两级型中型运载火箭，捆绑 4 枚助推器，长 46.3 米，起飞质量 312 吨，LEO 运载能力 7.4 吨，2004 年 11 月投入使用。此前，俄罗斯的载人飞船均由联盟-FG 火箭发射，而联盟 2-1a 主要承担货运飞船和卫星的发射任务。由于联盟-FG 火箭系统整体现代化程度较低，且采用了由乌克兰制造的模拟信号控制系统，因此俄国家航天集团决定采用完全由俄罗斯自主研制的联盟 2-1a 火箭将其取代，承担未来载人发射任务。

（二）SpaceX 公司猎鹰 9 火箭执行 2 次载人任务

2020 年 SpaceX 公司实现了两次载人飞行。5 月 31 日，SpaceX 利用猎鹰火箭和载人龙飞船成功将 2 名美国航天员送往国际空间站。执行本次发射任务的猎鹰 9 火箭采用全新的一子级，以满足 NASA 对载人任务的要求，任务中一子级成功在海上回收平台着陆。这是 SpaceX 公司在商业乘员计划（CCP）下的首次载人试飞，同时还是美国自 2011 年以来首次使用国产火箭从本土将航天员送往太空。11 月 16 日，SpaceX 公司再次使用一枚全新的猎鹰火箭成功发射一艘载人龙飞船，飞船搭载 3 名美国航天员和 1 名日本航天员。此次任务编号为 PCM-1，是美国重新执掌载人航天主动权后的第一次常态发射。NASA 计划 2021 年执行 PCM-2 任务，届时可能会采用复用火箭和飞船，不过 NASA 会为此进行额外的附加评审，并且不会允许 SpaceX 使用复用次数较多的一子级。

（三）日本 H-2B 执行最后一次货运任务

2020 年 5 月 21 日，日本 H-2B 火箭成功执行 HTV-9 货运飞船发射任务，



2020 世界载人航天发展报告

为国际空间站送去了超过 4 吨的补给物资。此次任务后，H-2B 火箭和 HTV 飞船将双双退役。退役后，H-2B 由 H-3 火箭替代，HTV 由 HTV-X 飞船替代。

H-2B 是在 H-2A 基础上研制的两级液体火箭，一级采用 2 台 LE-7A 氢氧发动机，捆绑 4 台大型固体助推器，二级采用一台 LE-5B 发动机。H-2B 是日本运载能力最强的火箭，专门用来向国际空间站发射 HTV 货运飞船，LEO 运载能力为 16.5 吨，GTO 运载能力 8 吨。H-2B 自 2009 年 9 月 10 日首飞以来，共执行 9 次 HTV 发射，全部成功。

（四）多国执行火星探测任务

在 2020 年 7—8 月的火星探测任务发射窗口期，多国执行了火星探测任务。7 月 20 日，日本 H-2A 火箭为阿拉伯联合酋长国发射了希望号火星轨道探测器；7 月 30 日，美国利用宇宙神 5 火箭发射了 NASA 的毅力号火星车。

2020 年 7 月 20 日，日本利用一枚 H-2A 火箭将阿拉伯联合酋长国希望号火星探测器发射升空。该探测器已于 2021 年 2 月 9 日抵达火星，并开始了周期为一个火星年（约为 687 天）的火星大气探测任务。本次发射任务是 H-2A 火箭自 2001 年投入以来执行的第 28 次任务。

2020 年 7 月 30 日，美国利用宇宙神 5 火箭将 NASA 的毅力号发射升空。毅力号于 2021 年 2 月 19 日成功登陆火星。本次发射任务是宇宙神 5 系列火箭自 2002 年首飞以来的第 85 次任务，是宇宙神 5（541）型火箭的第 7 次任务。

二、未来载人运载器项目进展

（一）美国

1. SLS 首飞时间恐再推迟

SLS 火箭是用于美国载人火星探测的专用重型火箭，自 2010 年开始研制。2020 年进展包括：启动芯级系列试验，并完成了前 7 次试验；首飞箭的



级间段运抵肯尼迪航天中心；完成芯级所有五个部段的结构试验。但 SLS 项目进度滞后和经费超支的问题仍未得到有效解决，再度引起关注。GAO 报告评估认为 SLS 超支 7 亿美元，而 NASA 给出的 SLS 火箭最新基线经费已经达到 91 亿美元，地面系统的基线研制经费为 24 亿美元，相比原来的 70.2 亿美元和 18.4 亿美元都有大幅增长。

该项目最初计划在 2018 年首飞，由于进度原因屡次推迟。2020 年受到新冠疫情的影响，原定于 2020 年的首飞任务被再次推迟至 2021 年 11 月。但在 2020 年 12 月 7 日进行的首飞箭芯级推进剂加注试验中发生了异常，液氧温度比试验要求增高约 2.2 摄氏度，这种差异可能造成输送管路中形成气泡。该问题属于地面加注流程问题，目前 NASA 正在制定新的液氧加注程序，加注合练与地面点火将推迟至 2021 年，2021 年 11 月首飞的进度安排再次遭到威胁。

2. 火神火箭

火神火箭是美国联合发射联盟（ULA）计划用于接替宇宙神 5 系列火箭和德尔塔 4 系列火箭的下一代运载火箭，计划在 2021 年进行首飞，可用于执行星际客船载人飞船、追梦者货运飞船和月球着陆器的发射。

火神火箭为两级固液混合火箭，芯一级直径 5 米，采用两台 BE-4 液氧甲烷发动机，初始构型采用半人马座上面级，后续构型采用先进低温渐进上面级（ACES），可根据任务需要捆绑 0、2、4 或 6 个固体捆绑助推器。火神火箭的近地轨道（LEO）运载能力 17.8~30.3 吨，地球同步转移轨道（GTO）运载能力 7.6~15 吨。未来，火神火箭的芯一级发动机将利用伞降技术实现回收复用。火神火箭为了适应载人发射任务，还在原有基础上增加了应急检测系统和载人任务的接口系统。

此外，ULA 公司为应对未来市场对高性能的需求，正在考虑将火神重型火箭用于“新兴但尚未成形”的近地轨道和地月空间市场。该型火箭将采用三个通用芯级，即“三芯型”结构，其运载能力大于在研单芯型的火神/半人马座火箭。

目前，火神 2021 年首飞箭的制造正在有序进行中，芯一级液氧贮箱和



2020 世界载人航天发展报告

甲烷贮箱已完成制造。GEM-63XL 固体发动机的首次地面静态点火试车已完成，点火约 90 秒，推力达到 1 997 千牛。

3. SpaceX 的星船原型机实现高空试飞

“超重-星船”是 SpaceX 公司目前的重点研制项目，计划未来替代其现有的猎鹰 9 和猎鹰重型火箭，同时该项目已获得美国政府及军方的投资，可能用于 NASA 重返月球计划和军方全球点对点货物运输，远期目标瞄准载人火星探测。该型号预计最早在 2024 年实现载人飞行。

“超重-星船”采用两级构型方案，火箭全长约 120 米，箭体直径 9 米，起飞质量 5 000 吨，LEO 运载能力超过 100 吨，并可运送 50 吨载荷返回地球。一级安装 28 台猛禽液氧甲烷发动机，二级安装 6 台猛禽液氧甲烷发动机，其中包括三台海平面版和三台真空版，液氧和甲烷推进剂均采用过冷加注方式。全箭主体结构采用不锈钢材料，以减轻热防护压力和降低制造成本，二级安装了前后两对驱动鳍和六个着陆支架以方便再入回收。

项目自 2019 年 3 月进入密集测试阶段，截至 2020 年底已对 1 架星跳号验证机、1 架 MK 全尺寸原型机、6 架 SN 系列原型机和多个 9 米直径不锈钢贮箱进行了测试，验证了星船导航系统、全箭不锈钢箭体的结构强度、新型着陆支腿以及其他一些基本功能。通过 SN8 星船原型机 12 月的 12.5 千米高空试飞，验证了 3 台猛禽发动机的性能，星船整体空气动力学再入能力，机身襟翼在下降过程中精准控制俯仰、偏航和滚转的能力，为型号后续的改进工作提供了重要实测数据。

4. NASA 选择猎鹰重型/龙 X 飞船为月球“门户”运货

2020 年 3 月 27 日，NASA 宣布选定 SpaceX 为月球“门户”提供货物运输服务。“门户后勤服务”（GLS）类似于国际空间站货运补给服务（CRS），也采取商业化模式，NASA 购买月球“门户”的往返货运服务，为“门户”和登月活动提供后勤补给支持。合同周期为 15 年，合同总额为 70 亿美元，但后续可能会有其他公司加入。

NASA 在 2019 年 8 月发布 GLS 项目招标文件，要求飞船将至少 3 400 千克的增压货物和 1 000 千克的不增压货物运往“门户”，并在离开时处理掉至少同



样多的货物。按招标文件，飞船每次任务要在“门户”上停靠长达一年，并有可能为站上航天员带来更多的空间。

根据评标文件，NASA 共对 SpaceX、诺-格、内华达山脉（SNC）和波音四家公司提出的货运服务方案进行对比评估，最终选择了 SpaceX 公司。后续，诺-格和内华达山脉公司可能还有机会获得货运合同，但波音已经被淘汰。

（二）俄罗斯

1. 俄计划调整重型运载火箭技术方案

俄规划的下一代重型运载火箭系列包括两种构型，即：叶尼塞和运载能力更大的顿河号。叶尼塞的近地轨道运载能力不低于 100 吨，月球轨道运载能力不低于 27 吨；顿河号的近地轨道运载能力为 140 吨，月球轨道运载能力为 33 吨。两型运载火箭可执行重 20 吨的雄鹰载人飞船和重 27~32 吨的月球基地模块的发射任务。首枚重型运载火箭研制计划的费用预计在 1 万亿~1.7 万亿卢布（约合 131 亿~222.75 亿美元）。

叶尼塞和顿河号的助推器与芯级均由独立的火箭产品构成。助推器将基于在研的联盟 5 火箭，而芯级将基于正在规划中的联盟 6 中型火箭，两部分通过捆绑的形式达到重型火箭的规模。联盟 5 火箭计划在 2022 年首飞，联盟 6 火箭计划在 2025 年首飞。

目前，俄国家航天集团计划在近两年内，根据重型火箭系统的运载火箭、地面基础设施、系统各组成部分生产设施的技术方案设计阶段性成果，对俄下一代重型运载火箭初步设计方案进行调整，火箭芯级有可能加长。

2. 俄追加安加拉系列火箭研制经费

计划用于执行俄下一代重复使用载人飞船雄鹰发射的运载火箭是安加拉-A5M，该型号是在安加拉-A5 基础上研制的。安加拉-A5 基本结构为通用芯级+直径为 3.6 米的通用二子级+微风 M 上面级/KVTK 上面级，并捆绑 4 个通用芯级作为助推器，近地轨道运载能力为 24 吨，2014 年完成首飞，2020 年 12 月 14 日进行第二次飞行。安加拉-A5M 是在安加拉-A5 的基础上去掉



2020 世界载人航天发展报告

二子级和三子级，配备发射终止系统，近地轨道运载能力为 18 吨。

根据俄国家航天集团公布的数据显示，安加拉系列火箭 2026 年前的研制及试验经费已由 260 亿卢布（约合 3.5 亿美元）增加至 450 亿卢布（约合 6 亿美元）。计划在 2023—2024 年制造的首枚安加拉-A5M 火箭成本为 61 亿卢布（约合 8 129 万美元），将于 2023—2025 年制造的第二枚安加拉-A5M 火箭成本为 62 亿卢布（约合 8 262 万美元）。

（三）日本

H-3 火箭是将接替现役 H-2A 和 H-2B 火箭的日本新一代主力火箭，在显著提升运载能力的同时，其发射成本将大幅降低，将会显著提升日本的航天运载实力。除了承担日本主要发射任务之外，H-3 火箭还将参与国际空间站的物资运输任务和美国的新一代登月任务。

H-3 因主发动机 LE-9 存在缺陷，原定于 2020 年进行的首飞任务推迟到 2021 年春天，第二次发射推迟至 2022 年。本次出现问题的发动机 LE-9 是日本宇宙航空研究开发机构全力设计的新一代氢氧发动机。2020 年 5 月在种子岛航天中心实施燃烧试验后，研发人员对该发动机进行内部检测后发现燃烧室内壁出现 14 处裂隙，其中最大的裂隙宽约 0.5 厘米，长约 1 厘米。此外，在向燃烧室输送液态氢泵的两个涡轮叶片中也发现了裂纹。研发人员推测，是由于发动机燃烧室内部实际温度远超设计预想的高温导致。研发人员计划尝试用液态氢给燃烧室内壁降温，并对涡轮机的质量重新进行审查。

（四）印度

2020 年，印度空间研究组织（ISRO）透露已完成 GSLV-MK3 载人火箭和 Gaganyaan 载人飞船的设计，将在 2020 年进行一系列试验。Gaganyaan 载人飞船计划进行 2 次无人飞行试验。受疫情影响，首次无人试飞由原计划的 2020 年推迟至 2021 年底进行。

GSLV-MK3 是印度目前最大的运载火箭，近地轨道运载能力约为 8 吨，2017 年 6 月 5 日成功首飞。ISRO 表示，印度载人火箭可靠性达 0.99，乘员逃逸系统的可靠性达 0.998。其中，乘员逃逸系统已经在 2018 年 7 月进行了



一次发射台逃逸试验。印度新型载人飞船发射质量为 7.8 吨，可以搭载 3 名航天员。

三、小结

2020 年，美国商业载人运输系统投入使用，使美国时隔 9 年重获载人发射能力，摆脱了对俄罗斯载人运输系统的依赖，世界载人航天格局发生了变化。未来，随着商业载人系统的发展和成熟，商业载人航天发射的占比将进一步扩大，可重复使用技术在得到充分验证后也将应用于载人领域。

为争夺载人领域以及深空探测领域的战略制高点，各国政府仍在积极推进下一代载人火箭和重型火箭的规划和研制，但受新冠疫情等因素影响，推进效果不尽如人意。美国政府主导研制的重型运载火箭 SLS 虽然加快了研制进程，但试验验证并不顺利，2021 年的首飞时间恐难保证。俄罗斯的下一代载人火箭和重型火箭仍在方案设计阶段，缺乏实质性进展。日本下一代载人火箭的首飞时间由 2020 年推迟至 2021 年。

（北京航天长征科技信息研究所）

2020 年国外载人航天器发展综述

2020 年，国外载人航天活动继续保持高度活跃态势。美国、俄罗斯等国持续推进国际空间站应用，针对低成本、常态化乘员和货物运输需求，载人龙飞船、货运龙飞船等 2 型飞船正式投入服务。与此同时，航天强国围绕载人月球探测目标，积极推动新型载人飞船、月球着陆器、地月空间站的研制工作，取得一定进展。整体看，国外新型载人航天器已进入大规模服役时期，为世界载人航天活动带来全新气象。

一、现役载人航天器任务情况

当前，国外仍主要围绕国际空间站开展载人航天任务，现役载人航天器均用于近地轨道的长期驻留、乘员和货物运输。2020 年，国外共实施 11 次载人航天器发射任务，全部取得成功。

（一）国际空间站

1. 发生空气泄漏事件，为进一步延寿带来不确定性

2020 年是国际空间站开启建造的第 22 年，也是持续有人驻留的第 20 年，期间取得了大量研究成果，同时也发生了多起故障。2020 年 8 月 20 日，NASA 和俄罗斯国家航天集团分别公布信息，称国际空间站存在空气泄漏，舱内气压持续下降，但不会危及航天员安全。



美俄最初制定了“隔离-识别-修复”三步解决方案，首先隔离各个舱段，确定具体哪个舱段泄漏；之后在空气泄漏的舱段进行精确探测，发现和识别泄漏点；最后根据实际情况，进一步修复泄漏点。在 8 月和 9 月，美俄进行了 2 次舱段隔离，最终锁定泄漏点位于星辰号服务舱。在利用超声探测等多种手段检测漏点位置无果后，俄罗斯航天员采用漂浮的茶包找到一处泄漏点，为一条 2~3 厘米的裂缝，并于 10 月和 11 月分别进行了临时和永久性修补。然而，完成修补后，国际空间站仍在继续漏气，专家推测星辰号服务舱存在其他泄漏点，截至 2020 年底尚未找到具体泄漏位置。

国际空间站先后 2 次延寿，最新计划工作至 2024 年，为了确保近地轨道载人航天活动的连续性，美俄有意进一步延长其任务周期。2019 年，美国参议院通过了将国际空间站延寿至 2030 年的法案。此外，美国提出国际空间站退役后，在近地轨道发展小型商业空间站，俄罗斯也计划基于现有的舱段建设俄罗斯独立的空间站。此次国际空间站空气泄漏事件发生后，美俄迟迟无法找到泄漏点和具体原因，外界表示对空间站老化问题的担忧，国际空间站进一步延寿的不确定性增加。

2. 瞄准发挥更大应用效益，持续部署商业舱段和平台

国际空间站在 2010 年完成大规模建设，随后，参与国家仍在持续补充重要设施，提升空间站的应用效能。2020 年，国际空间站除了通过货运补给任务运送科学仪器设备外，还先后安装了“巴托洛梅奥”（Bartolomeo）商用试验外部平台、“综合标准成像仪”（iSIM）、“象气闸舱”（Bishop）。

“巴托洛梅奥”外部平台由欧洲航天局和空客公司联合研制，由龙 CRS-20 任务运送至国际空间站，安置在飞船底部的非密封舱，通过舱外机器人安装到空间站哥伦布号（Columbus）实验舱外部。该平台专门用于为商业和研究机构用户提供在空间站外开展科学研究的机会，并可为各项实验提供全面的任务服务，其中包括载荷的准备、发射、安装、在轨操作、数据传输以及可选择性返回等方面的技术支持。“巴托洛梅奥”商用试验外部平台重约 468 千克，配备 12 个有效载荷隔舱，可用于开展地球观测、技术验证、天体物理和太阳物理学、材料科学、空间设备、商业太空探索等领域的研究。



2020 世界载人航天发展报告

“综合标准成像仪”是西班牙赛特兰蒂斯公司（Satlantis）研制的小型相机，核心为小卫星用的 iSIM-170 成像仪，此次安装在国际空间站希望号日本实验舱外部平台的中型暴露试验端口（i-SEEP）上，用于试验性对地观测。

“象气闸舱”是由纳米架公司（NanoRacks）、泰雷兹阿莱尼亚航天公司、波音公司联合研制的永久性气闸舱，由货运龙飞船 CRS-21 任务送至空间站，是国际空间站第一个商业建造和运营的气闸舱，能够用于舱外实验和释放小卫星等任务。“象气闸舱”安装在国际空间站宁静号节点舱上，外形呈钟形罐状，其尺寸根据龙飞船非密封舱的大小设计，直径 2.1 米，长 1.8 米，容积约 4 米³，是目前国际空间站上气闸舱容积的 5 倍。

（二）载人飞船

1. 联盟 MS 飞船开展两次任务，取得两项突破

2020 年，俄罗斯利用联盟 MS 飞船开展了 2 次国际空间站乘员运输任务，分别是 4 月 9 日的联盟 MS-16 任务和 10 月 14 日的联盟 MS-17 任务。

在联盟 MS-16 任务中，俄罗斯首次利用联盟 2-1a 火箭发射载人任务，实现了载人和货运火箭的通用。此前，俄罗斯通常采用联盟-FG 运载火箭执行联盟 MS 系列载人飞船的发射任务，联盟 2-1a 运载火箭则主要用于执行进步 MS 系列货运飞船的发射任务。为降低对进口器件的依赖，同时提升火箭性能，俄罗斯对联盟 2-1a 火箭进行技术升级，完全采用俄制器件组装，同时配备了新型数字飞行控制系统和升级型发动机，大幅提升入轨精度，接替了已执行数十年载人飞船发射任务的联盟-FG 运载火箭。

在联盟 MS-17 任务中，俄罗斯首次验证载人飞船的超快速（Ultrafast）交会对接模式，飞船发射后经过 2 圈飞行，仅用时 3 小时 3 分钟即成功与国际空间站对接，创造联盟 MS 飞船与空间站的最短交会对接时间纪录。最初，联盟飞船采用 34 圈交会对接模式，自主飞行超过 2 天后与国际空间站对接。2013 年 3 月，联盟 TMA-8 飞船首次采用 4 圈交会对接模式，发射后 6 小时可与国际空间站对接。此次任务是联盟飞船首次采用 2 圈“超快速”交会对接模式，航天员体验大幅提升，并能够运送高时效要求的载荷。



2. 载人龙飞船完成认证，投入正式商业乘员运输服务

2020 年，美国商业乘员运输计划取得重要成果，载人龙飞船分别于 1 月 19 日成功开展了发射逃逸试验、于 5 月 30 日成功开展了载人飞行试验，率先完成全部认证工作，于 11 月 16 日开启首次正式商业乘员运输服务。

在载人飞行试验中，载人龙飞船成功搭载 2 名航天员飞抵国际空间站，开展为期 64 天的任务，对飞船发射、交会、自主对接、停泊、再入、溅落、回收的整个飞行程序进行全流程测试和认证。此次任务是载人龙飞船首次载人航天飞行，也是航天飞机退役后时隔近 9 年美国再次自主将本国航天员送入轨道。

在首次正式商业乘员运输任务中，载人龙飞船搭载 4 名航天员飞抵国际空间站，计划在轨开展为期约 6 个月的科学任务。此次任务是世界首次利用商业载人飞船执行商业乘员运输服务，标志美国已补齐载人航天运输短板，摆脱对俄罗斯联盟飞船的依赖，正式恢复载人航天运输能力。

（三）货运飞船

1. 进步 MS 飞船开展常态化货运，并计划用于码头号对接舱离轨

2020 年，俄罗斯利用进步 MS 飞船执行 2 次国际空间站货运补给任务，分别是 4 月 25 日的进步 MS-14 任务和 7 月 23 日的进步 MS-15 任务。两次任务共计为国际空间站运送了约 5 500 千克货物，其中包括 2 870 千克设备和货物、1 250 千克燃料、840 千克水以及 506 千克压缩气体等。其中，货舱内的货物包括科学实验设备、生命保障系统配套组件、衣物、食品、医疗用品、个人卫生用品等。

进步 MS-14 货运飞船的任务除运送货物外，还利用自身发动装置对国际空间站进行轨道调整，从站上带走生活垃圾和废弃设备。根据计划，进步 MS-15 飞船或将在任务结束后用于国际空间站码头号对接舱的离轨操作，为计划 2021 年部署的科学号多功能实验舱留出空余对接口。



2020 世界载人航天发展报告

2. 龙飞船完成升级换代，整体性能大幅增强

2020 年，SpaceX 公司龙飞船顺利实现升级换代，第一代龙飞船于 3 月 7 日执行最后一次货运任务，SpaceX 公司第一阶段商业补给服务合同顺利完成；第二代龙飞船的货运型号——货运龙飞船于 12 月 6 日首飞，开启 SpaceX 公司第二阶段商业补给服务合同。

NASA 授予 SpaceX 公司的第一阶段商业补给服务合同总金额约 30.4 亿美元，SpaceX 公司已顺利完成，利用第一代龙飞船执行 20 次货运补给任务，总共向国际空间站运送 43 吨货物，返回 33 吨货物。龙飞船最后一次货运任务使用了重复使用的飞船，该飞船此前分别于 2017 年 2 月执行 CRS-10 任务，于 2018 年 12 月执行 CRS-16 任务，这是其第 3 次飞往国际空间站（ISS），提供物资和设备补给。

货运龙飞船首飞任务开启了第二阶段商业补给服务合同，总金额约 10.7 亿美元，SpaceX 公司需要利用第二代货运龙飞船完成 6 次补给任务。货运龙飞船基于载人龙飞船改进而来，与第一代龙飞船相比，货运龙飞船重点提升了运输能力和重复使用效率，回收检修后能够快速重复使用。

3. 天鹅座飞船提供商业货运，离站后开展多项实验并释放小卫星

2020 年，诺斯罗普-格鲁曼创新系统公司利用天鹅座飞船执行 2 次国际空间站货运补给任务，分别是 2 月 15 日的天鹅座 CRS-13 任务和 10 月 3 日的天鹅座 CRS-14 任务。这两次任务是 NASA 授予诺斯罗普-格鲁曼创新系统公司第二阶段商业补给服务合同的第二、第三次任务，总共为国际空间站运送了超过 6 900 千克货物，包括研究设备、乘员补给、系统补给、太空行走装备、计算机设备等。

两艘天鹅座飞船均搭载了航天器燃烧安全实验装置，研究不同材料、不同环境下火灾的发展、检测、监视、火情后清理能力，实验在飞船与空间站分离后进行，避免对航天员和空间站产生影响，研究成果还可应用于地面类似环境，例如潜艇、矿井等。此外，飞船还搭载了组织细胞培养装置、小型化扫描电子显微镜等实验装置。两次任务中，天鹅座飞船均搭载了 3 颗立方体卫星，在飞船与空间站分离后释放入轨。



4. HTV 飞船执行最后一次货运任务，后续将启用新一代 HTV-X 飞船

2020 年 5 月 21 日，日本发射 HTV-9 货运飞船，向国际空间站提供补给服务，此次任务是日本第 9 次、也是该型飞船的最后一次国际空间站补给任务。HTV 飞船又名“鸛”，是日本宇宙航空研究开发机构研制的一次性货运飞船，在欧洲自动转移飞行器（ATV）退役后，HTV 成为国外载货能力最大的货运飞船。从 2009 年 9 月起，日本通过 9 艘 HTV 飞船向国际空间站运送了约 49 吨货物。

HTV-9 任务后 HTV 型号飞船将退役，2021 年以后启用 HTV-X 型号飞船执行补给任务。与 HTV 相比，HTV-X 的整个结构做了重大改进，由加压货舱、非加压货舱、电子设备舱和推进舱组成的 4 舱改为由加压舱和服务舱组成的 2 舱结构，内部布局也进行了优化，加压舱和非加压舱可搭载货物质量分别提升了 0.5 吨。

二、在研载人航天器项目进展

国外除利用现役载人航天器开展任务外，积极推动载人航天能力升级，一方面围绕近地轨道连续有人存在，提升载人航天活动可持续性，另一方面瞄准载人月球探测，加速推动新型载人航天器系统研发（见表 1）。

表 1 国外载人航天器研制进展

类型	系统	国家	进展
空间站	科学号多功能实验舱	俄罗斯	完成全面检查，运抵发射场，计划 2021 年发射
近地轨道运输系统	星际客船	美国	完成首飞异常调查，计划 2021 年重新开展无人试飞
	追梦者航天飞机	美国	完成机翼主结构制造、风洞缩比试验，计划 2022 年首飞
载人月球探测系统	猎户座飞船	美国	完成热真空、电磁环境试验，计划 2021 年无人飞行试验
	载人着陆器	美国	授予 3 家公司方案设计合同，计划 2021 年选定最终方案
	“门户”地月空间站	美国	授予 2 个舱段研制合同，计划 2024 年合并发射
	雄鹰飞船	俄罗斯	完成绳索逃生装置测试，计划 2023 年首飞



2020 世界载人航天发展报告

（一）国际空间站俄罗斯新舱段

2020 年，俄罗斯继续推进国际空间站舱段研制工作。俄罗斯国家航天集团于 6 月完成了科学号（Nauka）多功能实验舱（MLM）的密封性、发动机加压系统、外部液压管路等全面检查测试，并于 7 月运往拜科努尔航天中心。

科学号多功能实验舱将与欧洲机械臂一起安装在国际空间站俄罗斯舱段，主要用于开展科学实验研究，在舱内外均设有实验平台，系统自动化程度高，能够减少航天员出舱次数。实验舱配备有休息室、厕所等设施，内部安装了 10 毫米厚的铝板防辐射罩，能够提供 6 名航天员生活所需的氧气，并具有再生饮用水的能力。

科学号多功能实验舱始建于 1995 年，是国际空间站曙光号多功能舱的备份，2004 年，俄罗斯决定将其改造为实验舱，计划 2007 年部署到国际空间站上，但进度多次拖延。2013 年，在进行系统检测过程中，发现燃料箱内有金属碎屑，因此重新更换相关管路。根据最新计划，俄罗斯将于 2021 年第二季度发射科学号多功能实验舱和欧洲机械臂，第 65 长期考察组的航天员将负责安装舱段和机械臂。

（二）近地轨道乘员和货物运输系统

1. 星际客船完成首飞异常调查，计划重新开展无人试飞

波音公司研制的星际客船于 2019 年 12 月开展无人飞行试验，但由于飞船计时器故障，星际客船未能与国际空间站对接，在 NASA 和波音公司的紧急处置下，在轨开展一系列技术验证后返回地球。2020 年 3 月 6 日，NASA 和波音公司联合组建的独立审查组完成对星际客船无人轨道飞行试验异常事件的初步调查，确认 3 项主要异常，并给出 4 大类、61 条改进和防范措施。2020 年 7 月 7 日，评审组新提出 19 条整改意见，正式完成事件调查。

结合事件异常表征、定性、直接原因、各方调查意见，整体看，波音星际客船无人飞行试验发生异常的原因如下：1) 研制流程失效，未严格按照科研和管理流程开发飞行软件；2) 测试方法不完备，试验没有充分反映系



统真实情况，不能及时发现问题、解决问题；3) 管理部门对商业载人航天监管不足、参与度不够，不完全掌握系统研制情况；4) 波音公司工作文化可能存在问题，最终导致不安全事件。波音公司接受相关调查意见，截至 2020 年底，NASA 称波音公司整改意见落实情况完成超过 90%。此外，波音公司提出自费重新开展一次无人飞行试验 (OFT-2)。

2. 追梦者航天飞机进度推迟，并计划向多用途方向发展

美国内华达山脉公司继续推进追梦者航天飞机的研制工作。2020 年 4 月，追梦者航天飞机机翼主结构完成制造；10 月，在 NASA 艾姆斯研究中心完成了一系列缩比模型风洞试验，试验中使用了 1/10 银质缩比模型，收集了大量气动数据，并能够辅助结构强度设计。由于受到新冠疫情影响，内华达山脉公司将追梦者航天飞机的首飞时间从 2021 年推迟到 2022 年。

内华达山脉公司计划制造 6 架追梦者航天飞机，近期为国际空间站提供货物运输，同时在 2030 年代为商业空间站提供货运服务。此外，内华达山脉公司还提出系统多用途化发展设想，包括发展载人型追梦者航天飞机；改造追梦者尾部的“流星”(Shooting Star) 模块，增加传感器和分系统，形成低成本、独立可执行任务的“轨道前哨站”等。

(三) 载人月球探测系统

1. “阿尔忒弥斯”计划研制工作加速，系统方案逐渐明朗

美国在 2024 年载人重返月球目标的驱动下，2020 年加速推进“阿尔忒弥斯”计划的实施，白宫发布了《关于鼓励国际社会支持空间资源获取和利用的行政命令》《深空探索和发展的新时代》报告，为月球资源利用铺平道路，并号召政府各部门支持“阿尔忒弥斯”计划；NASA 公布了《NASA 持续性月球探测与开发规划》《“阿尔忒弥斯”规划——NASA 月球探索计划概述》等多份文件，阐述“阿尔忒弥斯”计划的整体情况；同时，美国还加强软环境建设，NASA 先后与 8 个国家签署《阿尔忒弥斯协定》，明确月球开发利用的一系列行为准则，强化美国在世界航天中的话语权。载人航天器系统研制工作快速推进，猎户座飞船、载人月球着陆器、“门户”地月空间站均取得



2020 世界载人航天发展报告

相关进展。

猎户座飞船测试工作进入尾声。2020年2月，NASA完成猎户座飞船发射逃逸系统姿控发动机最后一次热试车；3月完成飞船热真空测试和电磁干扰测试等一系列环境测试；飞船已运送至肯尼迪航天中心，进行一系列发射前的最后测试和装配，完成发射前的最后程序。根据计划，NASA将在2021年利用航天发射系统火箭发射猎户座飞船，开展无人绕月飞行试验，并释放13颗立方体卫星。

NASA在2019年选定11家公司参与载人月面着陆器研究和设计的竞争，并于2020年4月进一步选定蓝源公司、航天动力公司、SpaceX公司3家公司开展载人月球着陆器开展方案设计，3家公司获得了10个月的研究合同，总价值为9.67亿美元，并于2020年10月完成了认证基线评审。NASA计划在2021年选定最成熟的设计用于首次登月。然而，着陆器在经费方面存在较大缺口，NASA为2021财年申请了32亿美元经费用于着陆器研制，但国会仅批准了8.5亿美元，给着陆器的研制带来重大困难，使2024年载人重返月球面临更大不确定性。

针对“门户”地月空间站的研制，NASA于2020年5月向麦克萨技术公司（Maxar）授出了电源和推进模块（PPE）的研制合同，并于7月向诺格公司授出了居住和后勤舱（HALO）的研制合同，并决定将两个舱段合并发射。与此同时，面对进度风险，NASA决定在“阿尔忒弥斯”计划下的首次载人登月任务中不使用“门户”空间站。

2. 雄鹰飞船研制工作正常推进，计划2023年首飞

俄罗斯围绕2030年载人登月发展目标，正在推进雄鹰（Orel）飞船的研制工作。2020年6月，俄罗斯航天国家集团开展了雄鹰飞船绳索逃生装置的测试，验证飞船在海面着陆的情况下，航天员沿绳索逃生至船外的任务情况。雄鹰飞船具有可重复使用能力，在近地轨道任务中能够使用10次，在月球轨道任务中能够使用3次。在载人月球探测任务中，飞船将飞至地球磁场以外空间，在高辐射环境下运行，并以第二宇宙速度再入地球大气层。

雄鹰飞船最早可追溯至2006年，俄欧合作开展概念研究，2009年俄罗



斯正式启动研制工作。飞船之前名为“新一代有人驾驶运输飞船”(PTK-NP)、“联邦”(Federation)，2020 年 1 月，俄罗斯航天国家集团将其重新命名为雄鹰。根据最新计划，俄罗斯拟于 2023 年从东方发射场利用安加拉-A5 运载火箭发射雄鹰飞船开展无人首飞，2025 年开展载人试飞，2029 年载人绕月飞行，2030 年载人登月。

三、小结

2020 年，国外载人航天取得了快速发展。近地轨道方面，国际空间站深化商业应用，商业公司部署了商业平台和首个商业气闸舱，载人龙飞船、货运龙飞船等新型载人航天器成功投入正式服务，为现役载人航天器引入全新能力。载人月球探测方面，美国积极落实加速载人重返月球计划，与 8 个国家正式签署《阿尔忒弥斯协定》，猎户座飞船、月球着陆器、“门户”地月空间站等系统研制工作有序推进，但在经费和进度方面存在一定困难；俄罗斯方面瞄准 2030 年载人登月，着力发展新型雄鹰载人飞船，研制进展顺利。

(北京空间科技信息研究所)

2020 年国外航天员系统发展综述

2020 年，国际空间站第 61—64 长期考察组执行驻站任务，乘员们在轨开展了生物学、人体科学、地球科学、物理科学以及技术开发等领域的大量科学研究，并针对国际空间站出现的空气泄漏状况展开了一系列的检查和维修操作，以确保航天员驻站安全。为满足未来登月任务需求，美俄继续新一批航天员选拔。NASA 发表在轨航天员发生血栓及处置的首例报告，并持续跟踪在轨航天员的大脑和视觉变化。与此同时，在地面开展各类模拟试验，以揭示人体如何适应极端环境。

一、国际空间站驻站任务

2020 年，国际空间站第 61、62、63 长期考察组完成驻站任务顺利返回，第 64 长期考察组于 10 月抵达国际空间站，将驻留 186 天。

国际空间站第 61 长期考察组共驻站 201 天，期间 NASA 两名女航天员克里斯蒂娜·库克和杰西卡·迈尔完成两次舱外活动，这是第二次和第三次全部由女性进行的舱外活动，两名航天员成功地将空间站一对太阳能电池板上的镍氢电池更换为更新、更强大的锂离子电池。经过此次任务，先后担任国际空间站第 59、60、61 考察组乘员库克成为单次飞行时间最长的女性。在她的这次创纪录驻留任务中，库克参与 210 多项研究。这些研究将有助于推动 NASA “阿尔忒弥斯”计划下的人类重返月球的目标，也有助于载人探



索火星的准备工作，包括研究人体如何适应失重、隔离、辐射以及长期航天飞行产生的应激等。

国际空间站第 62 长期考察组共驻站 205 天，驻站期间，考察组接待了两艘美国龙货运飞船和两艘天鹅座货运飞船。NASA 航天员克里斯·卡西迪和罗伯特·本肯完成了创纪录次数的太空行走：成功升级国际空间站电力系统并修理 AMS-02 阿尔法磁谱仪。截至 2020 年底，本肯累计出舱 61 小时 1 分，紧随迈克尔·洛佩斯-阿莱格里亚和安德鲁·弗斯特尔之后。卡西迪累计出舱 54 小时 51 分，全球排名第 9。本肯和卡西迪由此成为出舱次数最多的美国航天员。

国际空间站第 63 长期考察组共驻站 196 天，驻站期间国际空间站出现轻微泄漏，不过这一情况并没有威胁到驻站乘员的生命和健康。

二、航天员选拔与训练情况

（一）NASA 新一批预备航天员毕业

NASA 新一批航天员于 2020 年 1 月 10 日完成基本训练。该届航天员包括 11 名 NASA 预备航天员，以及加拿大航天局（CSA）2017 年选出的两名预备航天员。NASA 的预备航天员是从 18 000 多名申请者中选出的，其中有 6 名男性和 5 名女性航天员，7 人有从军经历。所有预备航天员都完成了太空行走、机器人、国际空间站系统、T-38 喷气式飞机的熟练操作和俄语等方面的训练。作为航天员，他们将协助研发飞船、支持目前在国际空间站上的团队，将可能执行包括国际空间站、“阿尔忒弥斯”登月、火星探索等任务。

（二）美国为重返月球计划招募第二批航天员

2020 年 2 月 11 日，NASA 宣布为“阿尔忒弥斯”登月计划招募第二批航天员。3 月 2 日至 3 月 31 日接受了网上申请，共计超过 1.2 万人申请加入。预计 2021 年中选出这批航天员候选人并开展训练。

根据 NASA 的要求，应聘的基本条件是拥有 STEM 领域的硕士及以上学



2020 世界载人航天发展报告

位的美国公民，专业包括工程学、生物科学、物理科学、计算机科学或数学等。这是该机构首次要求申请者必须拥有硕士学位。之前历届航天员选拔，NASA 仅要求申请者拥有学士学位，或者是合格的飞行员。拥有医学博士学位或骨科医学博士学位的人也可报名。此外，应聘者还必须拥有 2 年以上相关从业经历，或者至少拥有 1 000 小时的喷气式飞机驾驶经验。航天员候选人还必须通过 NASA 的长期航天飞行体检。作为申请过程的一部分，申请人首次被要求参加长达 2 小时的在线评估。

自 20 世纪 60 年代以来，NASA 共选拔了 350 人作为预备航天员进行培训，现役航天员队伍共有 48 人，未来将需要更多的航天员前往太空多个目的地。

（三）NASA 公布“阿尔忒弥斯”登月计划首批航天员名单

12 月 10 日，NASA 公布入选“阿尔忒弥斯”登月计划的首批航天员名单，一共 18 人，9 男 9 女，其中包括 12 名军人。平均年龄为 42.27 岁，最高年龄为 55 岁，最年轻的为 32 岁。这 18 名航天员的经历大不相同，有的已多次执行过航天飞行任务，飞行时间接近 1 年，有两人目前正生活在国际空间站上；也有从未执行过航天飞行任务的新手。NASA 并未透露为何选择这些人，也未披露选拔标准。该局表示，未来还会有更多人“根据需要”加入进来，包括来自国际伙伴的航天员。NASA 尚未为任何“阿尔忒弥斯”任务安排乘组，针对首次登月任务的具体飞行训练，将在离发射还有一年半到两年时间启动。

（四）俄罗斯完成新一批航天员选拔工作

2020 年底，俄罗斯完成了新一轮航天员的选拔工作，共有 4 名人员入选。目前为止，俄罗斯航天员大队共有 30 名现役航天员和 4 名预备航天员。此次航天员选拔，是苏/俄历史上第 18 次选拔，也是第 3 次面向全社会公开选拔航天员。

本次俄罗斯航天员选拔活动于 2019 年 6 月启动，第一阶段，接收参选申请，于 2020 年 6 月 1 日结束。据悉，共有 1 984 人提出参选申请，总计有



156 名申请人递交了齐全的申请材料，其中含 123 名男性和 33 名女性；有 13 人来自航天领域，11 人为军人。第二阶段，即面试阶段于 7 月开始。从申请人中共计遴选出了 59 名申请人参加面试选拔，其中包括 3 位女性。

三、航天医学研究进展

（一）NASA 发表在轨航天员发生血栓及处置的首例报告

2020 年 1 月 6 日的《新英格兰医学》杂志上刊登论文，描述了一名驻留在国际空间站的航天员因血液流动停滞导致颈内静脉血栓的病例，这是对参与长期任务的航天员进行研究时发现的一个前所未有的航天飞行风险。这项研究测量了长时间航天飞行中航天员头部血液和组织液持续流动时颈内静脉的结构和功能，这不仅有利于地球上的病人，而且将在未来的深空任务中对航天员的健康至关重要。

在飞行任务中，航天员在预定时间内的不同位置进行了颈内静脉超声检查。任务开始大约两个月后的超声波检查结果显示，一名航天员体内有疑似阻塞性左颈内静脉血栓（血凝块）。航天员开始使用空间站存放的依诺肝素（一种类似肝素的血液稀释剂）进行治疗，随后口服抗凝剂（通过补给飞船运输）。虽然在第 47 天血栓逐渐缩小，并可诱导血流通过受影响的颈内段，但抗凝治疗 90 天后仍然没有自发血流量。航天员在返回地面 4 天前停止服药。

着陆时，经超声波检查后显示剩余的血块平贴在血管壁上，无需进一步抗凝。这一现象在着陆后 24 小时内存在，10 天后消失。返回地面 6 个月后，航天员仍然没有症状。血液组织和血流的变化，以及研究中发现的血栓前病变风险，显示了进一步研究的必要性。

（二）长期航天飞行使航天员的大脑发生变化

科学家开展了一项对国际空间站上长期驻留航天员的大脑工作的研究，结果表明，长时间暴露于微重力会改变大脑的体积，并使垂体变形。对这些



2020 世界载人航天发展报告

国际空间站乘员进行的检测表明，他们的大脑容积和脑脊液量已增加。并且这些变化在他们返回地球一年后仍旧没有消失，主要的改变是大脑的白质以及脑部主要激素中心之一的垂体。

研究人员指出，其中一些变化对航天员存在一定危险。神经系统结构的一些其他变化，与脑积水和较高的颅内压导致的后果非常相似。科学家认为，它们与微重力作用下人体体液的重新分布有关。鉴于这些不良影响，NASA 和其他太空机构应该考虑开发离心机和一系列的预防性锻炼措施，以模拟地球引力对航天员和他们大脑的作用，并防止此类变化的出现。

（三）研究发现 ISS 上培养的细胞的重要变化

为了进行心脏干细胞研究，研究人员在国际空间站上培养了人的心脏干细胞或心血管祖细胞（CPC）。这些未成熟的心脏细胞可以发育成几种不同类型的心血管细胞，并能产生更多的心血管细胞。

最新的发现表明，微重力可以诱导成年人的 CPC 表达 Yes 相关蛋白（YAP1）。YAP1 是心血管修复的关键因素之一，当 YAP1 上调或表达水平升高时，可促进心血管再生。但 YAP1 表达的改变是暂时的，这种效应的暂时性是一件好事，否则细胞会以不受控的方式增殖并导致癌症。研究小组还发现，模拟微重力环境与实际的微重力环境具有相同的作用效果。研究人员可以很容易地从回转器（地面上模拟微重力环境）中获取样本，而不是在距地球 300 千米的轨道上获取样本。

（四）国际空间站研究持续关注航天飞行的视觉变化

2015 年，NASA 人体研究计划启动了一项“体液转移”研究，该研究通过测量流入和流出头部的体液，来了解这些变化如何导致视觉的变化。该研究一直持续到 2020 年秋季。该项研究首次揭示了失重状态下大脑血液流出的变化，此外，还对使用下半身产生压差以防止或逆转体液转移的装置进行评估。NASA 一年期任务的生理变化检查中也包括视觉。

在 NASA 载人探索与运营计划（HEO）开展的一项早期研究“视力损害与颅内压”（VIIP）中，采用磁共振成像和其他工具来检查乘员眼睛结构的



变化。由于缺乏重力，体液头向分布会导致大脑压力增加，从而导致眼睛结构和视力的变化。但目前尚不清楚缺乏重力是否会导致大脑压力的改变。随着体液压力不再被认为是唯一的原因，这种状况又被称为“航天飞行相关神经-眼综合征”（SANS）。虽然 SANS 的确切病因仍不清楚，但迄今为止越来越多的研究证据表明，它涉及多个因素：可能是头部压力增加，也可能是血管充盈过度、炎症、环境中二氧化碳水平升高、辐射、遗传和维生素 B 的营养状况等。大约 70% 的乘员都有 SANS 的迹象，但个体差异很大。SANS 代表了深空探索的一个关键风险，因为航天员将经历更长时间的太空飞行，而且无法轻易返回地球以应对医疗紧急情况。

（五）肠道微生物可以让太空旅行者在长期飞行中保持健康

长期航天飞行会对太空旅行者的健康造成严重影响，包括对新陈代谢、骨骼和肌肉健康、肠胃健康、免疫和心理健康产生负面影响。《生理学前沿》杂志上的一篇新评论强调，促进肠道微生物群的健康可以保护太空旅行者免受环境的严酷影响。控制肠道微生物群可能是在航天器上维持健康的一种有效方法。基于益生元和益生菌的营养对策对保护太空旅行者大有裨益。事实上，可以选择很多种类的益生元和营养来保护太空旅行者免受航天飞行特殊环境的影响。然而，要找出哪种治疗方法最有效，以及如何对每位太空旅行者最好地使用它们，还有很多工作要做。

（六）辐射研究受到高度重视且取得部分进展

1. 太空健康转化研究所资助太空辐射研究计划

美国航天健康转化研究所（TRISH）发布一项新的资助计划，寻求并资助高风险、高回报的解决方案，以预测和保护未来执行深空任务中航天员的健康。银河宇宙辐射将是航天员在 NASA 计划 2024 年前重返月球和火星任务时面临的重大健康和绩效挑战。作为 NASA 人体研究计划的合作伙伴，太空健康转化研究所帮助解决人类深空探索面临的健康挑战。该研究所发现并资助破坏性的问题研究和突破性技术，这些研究和可以减少航天员健康



2020 世界载人航天发展报告

和绩效面临的风险。

2. NASA 通过地基模拟银河宇宙射线来研究对航天员健康的影响

为了保证航天员和深空任务的安全，需要更好地了解包括银河宇宙射线在内的各种空间辐射对健康的危害，理想的情况是能够在地面实验室条件下检测银河宇宙射线影响。2020 年 5 月发行的《公共图书馆科学：生物学》刊发一篇论文，描述了一种在实验室产生真实的银河宇宙射线的方法，研究人员利用最近发展起来的快速束流切换和升级的控制系统技术，能够在短时间内快速、反复地进行多种离子能量束的组合切换，同时精确地控制重离子传送的极少量的日剂量。科学家们已经开始将动物模型暴露在模拟的银河宇宙辐射场中，希望能够确定这些高能粒子对器官组织的影响，并测算出癌症、心血管疾病和神经系统紊乱的风险。

3. 国际空间站上培养的益生菌具有抗辐射功能

俄罗斯加加林航天员训练中心杂志刊登的一篇研究报告指出，在国际空间站实验过程中获得的益生菌中，科学家发现了可使人体对辐射更具抵抗力的物质。

根据专家的意见，可以通过益生菌将这些影响降到最低，也就是说，活性微生物可以改善宿主的健康。在实验过程中形成的代谢产物中有乳酸和琥珀酸盐，这些物质可以增强人体的抗辐射能力。此外，根据科学家的说法，在国际空间站上培育的益生菌的抗氧化潜力比在地球上获得的样品略高。专家认为，这可能是跟以下因素相关：细菌因国际空间站较强的辐射背景而产生了更多的保护物质。

四、生命保障技术发展

（一）国际空间站顺利完成生命保障系统升级

2020 年 3 月，NASA 在 SpaceX 的第 20 次补给任务中，向国际空间站交付了升级后的生命保障设备。



空间站的水回收系统通过回收废水提供清洁水，这里的废水包括乘组人员尿液中的水、舱内大气冷凝水和乘组人员航天服内水合系统中的水。重新设计的尿液蒸馏组件把航天员的尿液煮沸以开始净化，将其集成到空间站的尿液处理器组件，并进行测试，以确保设备功能符合预期。回收的水必须满足严格的纯度标准，才能用于支持乘员、太空行走或有效载荷等。尿液处理器产生的水与所有其他废水混合，并输送至水处理器进行处理。水处理器将水通过一系列过滤材料和化学反应进行净化。水的纯度由系统中的电传感器进行检查，不合格的水将重新处理，直到达到纯度标准。干净的水被送到一个储水箱里，供乘员使用。

此次升级的重点是设备内部的重新设计，包括一个新的齿带传动系统、轴承密封件、特氟龙垫片和液位传感器，所有改进将有助于控制设备的蒸汽和流体环境，从而为乘员提供尽可能干净的水。此前，蒸馏组件在运行约 1 400 小时后可能会出现零件故障。随着最新迭代中包含的升级，工程师预计在不更换部件的情况下，使用寿命将超过 4 300 小时。蒸馏装置每天只运行几个小时，就可帮助乘组将他们在空间站所需水的 90% 进行回收，因此预期寿命可以延长数年。

（二）开启新时尚的 SpaceX 航天服

SpaceX 公司的航天服设计为一体式白色航天服，比体积庞大的航天飞机舱内航天服更时尚，后者也被称为“高级乘员逃生服”（ACES）。

SpaceX 强调，航天服与大型电脑面板是“共生”的，航天员可使用这些电脑面板来监控龙飞船系统，并将飞船导航到国际空间站。SpaceX 公司的航天服设计实用、轻便，并能防止潜在的减压情况。减压防护类似于航天飞机舱内航天服，服装配有应急呼吸系统，在舱内突然缺氧时能够完全加压。服装腿部的一个接口可以连接生命保障系统，包括空气和电力接口。头盔是使用 3D 打印技术制造的，包括集成的阀门、遮阳面罩收缩和锁定机构，以及头盔结构内的麦克风。



2020 世界载人航天发展报告

（三）首批舱外航天服材料随毅力号火星探测器启程

2020 年 7 月，NASA 毅力号火星探测器于卡纳维拉尔角 41 号发射台升空，开启了它前往火星寻找古生命迹象、采集样本、为未来载人登火星铺平道路的任务之旅。此次任务中，毅力号还带去了包括头盔面罩在内的 5 个舱外航天服材料样品，这是有史以来第一批送往这颗红色星球的航天服材料样品。5 种舱外航天服材料分别为：

- 三合一正交织物材料（Ortho-Fabric），包括高熔点芳香族聚酰胺（Nomex），是一种消防服中使用的阻燃材料；膨体聚四氟乙烯（Gore-Tex），能防水透气；凯夫拉纤维（Kevlar），曾用于防弹背心。

- 聚芳酯纤维（Vectran），目前用于制作舱外服手套的手掌，具有抗切割性。

- 已经在舱外航天服中使用的特氟龙（Teflon）材料，用它制作航天员手套护腕的一部分和手套背面，其表面很光滑，这样就更难抓住和撕破织物。

- 带有防尘涂层的特氟龙样品。

- 聚碳酸酯，用它来制造头盔泡泡和面罩，它的优点是不会破碎，如果受到冲击，它只会弯曲而不是断裂，并具有良好的光学性能。另外它还有助于减少紫外线。

（四）研究证实太空生菜营养丰富且安全

目前，国际空间站上的航天员已经成功地种植了一种叫做 Outredgeous 的红色长叶生菜。科学家们在肯尼迪航天中心实验室的受控环境中也种植了这种作物，其生长条件与国际空间站相似，以进行对照。通过比较，科学家发现太空生菜和地球“同胞”的成分相似。不过，一些太空生菜含有较高浓度的维生素和其他元素，包括钾、钠、磷、硫和锌。经测量，研究人员发现太空生菜中酚类物质的含量较高，这些物质具有抗病毒、抗癌和抗炎的特性。

研究人员还利用下一代 DNA 测序技术，鉴定存活在太空生菜上的真菌和细菌群落。他们发现，空间生菜叶上最丰富的 15 个微生物属与生活在对



照作物上的相似。两种作物根部的真菌和细菌也很相似。测序显示没有已知细菌属会导致人类疾病。这证明生长在国际空间站上的红叶生菜是安全可食用的。未来，科学家们还将试验研究其他类型的叶状作物，以及辣椒、西红柿等小型水果，为航天员提供新鲜农产品。

（中国航天员科研训练中心）

2020 年国际空间站科学研究与应用发展综述

2019 年 9 月到 2020 年 10 月，国际空间站第 61—63 次长期考察任务在技术开发与验证、物理科学、生物学与生物技术、人体研究、教育和文化活
动及地球与空间科学 6 大研究领域共开展了 318 项科学研究实验。

一、科学研究与应用概况

美国国家航空航天局（NASA）、欧洲航天局（ESA）、日本宇宙航空研
究开发机构（JAXA）和加拿大航天局（CSA）在 6 大研究领域支持开展的
实验项目数及其中新实验的项数如表 1 所示。由于俄罗斯国家航天集团
（Roscosmos）未公布第 61—63 次长期考察任务实验数据，因此本次分析不
包括俄罗斯支持开展的空间科学实验情况。

表 1 国际空间站第 61—63 次长期考察任务中各航天局在各研究领域
支持开展的实验项数（括号中为新实验项数）

领域 机构	技术开发与 验证	物理科学	生物学与 生物技术	人体研究	教育和 文化活动	地球与 空间科学	总计
NASA	92 (47)	37 (24)	44 (22)	14 (5)	18 (10)	16 (3)	221 (111)
ESA	9 (1)	19 (3)	2 (2)	11 (1)	4 (1)	1 (0)	46 (8)
JAXA	15 (5)	7 (1)	10 (4)	4 (1)	4 (3)	5 (2)	45 (16)
CSA	1 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (0)	1 (0)	0 (0)	6 (0)
总计	117 (53)	63 (28)	56 (28)	33 (7)	27 (14)	22 (5)	318 (135)



在第 61—63 次长期考察任务开展的全部 318 项实验中，NASA 支持开展 221 项，其中技术实验最多，其次为生物和物理科学实验。ESA 和 JAXA 总实验数接近，ESA 支持的物理科学和人体研究实验相对较多，JAXA 支持的技术和生物实验相对较多。CSA 支持的人体研究实验相对较多。在全部 318 项实验中有 135 项为新实验，其中 111 项由 NASA 支持开展，技术、物理和生物领域的新实验较多。

二、科学研究与应用进展

（一）技术开发与验证实验

1. 研究概况

技术开发与验证实验共计 117 项，其中 53 项为新实验，NASA、JAXA 和 ESA 分别支持开展了 47 项、5 项和 1 项新实验，小卫星及控制技术、表征实验硬件等研究方向的新实验最多。

2. 研究进展和新变化

NASA 支持开展了 13 项小卫星及控制技术新实验。Alpha 立方体卫星将按照地面指令展开配备 4 个芯片卫星的 1 平方米自由飞行光帆，旨在验证光帆推进用高逆反射材料的性能，以及下一代芯片卫星的定向和 GPS 跟踪等重要功能。“Ka 波段软件定义无线电”实验旨在将 Ka 波段硅锗有源电子扫描阵列等地面新兴技术引入空间应用。RadSat-u 立方体卫星采用新方法检测单事件效应并减轻其影响，评估可探测并承受空间辐射影响的计算机的性能。“SEOPS 公司-Minicarb”立方体卫星用于测试新型被动掩星指向仪，探测对流层中的甲烷、二氧化碳和水，开展气候变化研究。“SEOPS 公司-VPM”立方体卫星旨在探测近地轨道的自然和人为甚低频射频频源，推动可展开复合天线和小型信号处理电子设备等卫星技术的发展。“SEOPS 公司-WIDAR”采用基于被动干涉测量的新型雷达成像技术开展对地观测。“技术教育卫星-10-按需样品返回能力开发”实验旨在进一步开发“外构刹车”拖曳式离轨



2020 世界载人航天发展报告

系统，开展首次受控瞄准离轨实验。“冷却、退火和指向技术验证卫星”验证主动热控制系统，测试基于单光子雪崩探测器的空间辐射损害减缓方法，利用应变驱动可展开面板改进指向控制。“闪烁观测：电离层对电动力学的响应”实验研究地球高层大气中的波状等离子体扰动。“烧蚀的气动热力学研究与测量立方体卫星”测试再入大气层的热防护系统，包括 Cork P50 和碳化硅陶瓷等材料。“下降”实验包括 2 颗由总长 100 米的电动系绳连接的立方体卫星，相关技术有望用于近地轨道卫星离轨。“优秀本科生通信工程科学计划”立方体卫星旨在验证 X 波段相控阵天线的天-地通信。CySat-1 立方体教育卫星由学生设计建造，搭载辐射计开展土壤湿度遥感测量。

NASA 支持开展了 5 项表征实验硬件新实验。“改进国际空间站生物分析设施的一步式基因采样工具”实验旨在测试直接从组织中采集核糖核酸的技术，简化在轨基因测试流程。安装在国际空间站舱外的“纳米机架-Craig X 飞行实验平台”为各工业领域开展实验提供机会，此次实验研究空间环境暴露对增材制造材料等多种样品的影响。Rogue-1 原型立方体卫星旨在演示近地轨道轻量型低成本光学传感器的快速开发。“太空链”实验验证地面站与在轨区块链有效载荷之间的交易所需的硬件和软件。“Ariel 大学首颗纳卫星”是一个旨在测试星地光通信的低成本纳卫星平台。

NASA 支持开展了 4 项成像技术新实验。“Butterfly IQ 超声仪”实验验证空间环境中便携式超声仪与移动计算设备结合应用的有效性。“Cubelab 显微成像技术验证”实验旨在为空间探戈公司开发的标准实验模块立方体实验室测试新增的显微成像硬件性能。“变形镜立方体卫星”实验在轨测试微机电系统变形镜，验证空间环境适用性以及对于遥远目标进行主动图像校正的能力。“SEOPS 公司-EDGE CUBE”立方体卫星以约 200 千米的分辨率探测地表红边区域（叶绿素吸收光谱中 680~750 纳米区域），测量植被的季节性变化和生态系统压力。

NASA 支持开展了 4 项航天器和轨道环境新实验。Neutron-1 立方体卫星绘制近地轨道中子丰度图，以增进对日地关系的理解。“SwampSat II 立方体卫星”将展开高灵敏度的 16 米方环天线，测量地球高层大气中的甚低频波的传播，了解高能辐射带粒子损耗。“轨道工厂-2”立方体卫星利用增材制造



技术在轨打印导电墨水印刷电路板，未来有望用于在轨修复太阳能电池。“射频识别自主后勤管理-2”实验旨在探索利用移动机器人上的射频识别系统在长期深空任务的自主后勤管理中的作用。

NASA 支持开展了 3 项航电设备和软件新实验。“测距和计时实验的机会立方体卫星信号”实验旨在验证用于深空导航的 X 射线导航技术，并研究太阳 X 射线耀斑。“俄亥俄大学全球导航卫星系统星座间时间偏移测定立方体卫星”利用搭载的商用多星座、多频率全球卫星导航系统接收机测量时间偏移值。“探索可重构自适应环境的棋盘形电磁空间结构”实验测试一种自主的自组装瓦片式机器人，探究利用该技术在轨建造卫星和未来空间栖息地的可行性。

NASA 支持开展了 3 项航天器材料新实验。“SEOPS 公司-MakerSat”立方体卫星旨在验证基于国际空间站的立方体卫星微重力增材制造、组装和部署技术概念。“国际空间站材料实验-12-商业”实验开展新型 3D 太阳能电池的空间暴露研究，研究不同的吸光剂和太阳能电池对太阳照射角度和空间环境退化的响应。“航空立方体卫星-14 A&B”旨在对新型星跟踪器挡板、纳米材料和新型太阳能电池空间暴露、模块化实验的标准化接口进行测试。

NASA 支持开展了 2 项空气、水和表面监测新实验。“SEOPS 公司-空间小型红外辐射计”实验验证立方体卫星星座的热红外波段对地辐射成像技术。“空气悬浮颗粒监测仪”是国际空间站上首个基于悬浮颗粒的浓度量化空气质量的仪器，可测量直径从 10 纳米至 20 微米的气溶胶。

NASA 支持开展了 2 项灭火和探测新实验。“航天器火灾实验-4”“航天器火灾实验-5”系列实验旨在“天鹅座”飞船返程期间开展不同材料和环境条件的火焰蔓延研究，验证火情探测、监测和火灾后清理能力。

NASA 支持开展了 2 项生保系统和居住新实验。“集水器国际空间站技术验证”实验测试分离和捕获空气的水滴集水器装置的有效性。“在国际空间站通过电化学技术阐明氨电化学氧化机理”实验数据用来预测空间中氨燃料电池的性能。

NASA 支持开展了 2 项机器人技术新实验。“机器人控制 Astrobee 跳跃机动”是一项利用舱内自由飞行器 Astrobee 及其机械臂开展的纯软件实验，



2020 世界载人航天发展报告

演示舱内活动机器人开展跳跃活动的操控方法。“减重力壁虎胶粘剂对接实验”采用微图案胶粘剂（仿壁虎爪材料）捕获翻滚的目标物体，利用多个 Astrobee 自由飞行器测试追赶卫星与目标卫星的自动对接，验证空间碎片主动清除新方法。

NASA 支持开展了 2 项辐射测量和防护新实验。“防护空间辐射的生物染料”实验研究生物染料在防护国际空间站内部环境辐射方面的作用，并分析辐射对植物早期发育的影响。“生物哨兵国际空间站控制实验”利用送到国际空间站的模式生物酵母菌株研究生物对空间辐射的响应。

NASA 开展的其他技术新实验包括：“涡轮陶瓷制造模块”实验研究在微重力下制造商用单片陶瓷涡轮叶盘的能力。“航天服蒸发抑制飞行实验”验证将水蒸发冷却技术用于舱外活动航天服的散热。“空间风土：空间食品发酵过程研究”实验研究空间环境对食品发酵的影响。“阿迪达斯公司 BOOST 运动鞋在轨颗粒填充”实验研究微重力下颗粒团被吹入空腔以形成 BOOST 运动鞋中底的行为。CryoCube 实验利用可展开防护罩阻隔辐射，测试被动冷却技术。

JAXA 支持开展了 5 项新实验。G-SETELLITE 立方体卫星将拍摄以地球为背景的动漫人物手办图像，宣传东京奥运会和残奥会。“卢旺达卫星-1”由卢旺达和日本合作开发，配备 2 台农业监测相机和 1 个用于接收地基传感器数据的接收器。“日本实验舱远红外相机验证”实验利用能够在无光线的条件下拍摄红外图像的相机远程测量包括舱外载荷在内的目标物温度，有望增加航天器交会的机会。“日本实验舱 Avatar-X 相机”实验验证远程机器人技术，地面用户可远程控制安装在日本实验舱窗口附近的新型 4K 相机 Avatar-X 观看风景。“H-II 转移飞行器无线局域网演示”实验旨在验证航天器与国际空间站之间的实时无线视频传输。

ESA 新实验“冰立方实验-立方体 6-Kirara”实验旨在测试 1U 大小、配备了温度控制器的培养箱在微重力下培育高质量蛋白质晶体的能力，为未来日本和欧洲多家企业和机构相关研究铺平道路。此外，“小型光通信系统验证”“中子场辐射研究-2”等 64 项实验继续开展。



(二) 物理科学实验

1. 研究概况

物理科学实验共计 63 项，其中新实验有 28 项，NASA、ESA 和 JAXA 分别支持开展了 24 项、3 项和 1 项新实验，材料科学和流体物理研究方向的新实验最多。

2. 研究进展和新变化

NASA 支持开展了 9 项材料科学新实验。系列“国际空间站材料实验”开展了 3 项新实验，继续利用国际空间站材料实验飞行设施定性和定量检测近地轨道环境对各类材料和器件的影响。系列“密封安剖瓶中利用挡板的凝固实验”开展了 2 项新实验，“合金凝固过程中对流对柱状结构向等轴状结构转变的影响”实验数据和模型有助于改进高质量金属合金件的生产；“碘化铟的分离熔化和气相生长”实验在微重力条件下培育高质量碘化铟单晶。“药物赋形剂成分在微重力下的稳定性”评估微重力和辐射对赋形剂基质药物长期稳定性的影响。“宽带角度选择光学材料的制备工艺条件实验”旨在增进对多层聚合物形成和结晶原理的了解。“轮询调度法测量热物理性能”实验测量微重力下熔融金属特性，更好地了解液体流动控制技术。“纳米机架-Astrileux 公司”实验评估空间暴露对一种在极紫外波段具有优异光学性能的新型工程材料的影响。

NASA 支持开展了 8 项流体物理新实验。系列“填充床反应器实验”开展了 2 项新实验，旨在开发出一套可在微重力环境下运行的填充床反应器的指导文件 and 设计工具，增进对填充床反应器在微重力环境下出现气体阻塞的理解。“国际空间站合成反应流动化学平台实验”验证可开展微重力对液体混合和化学反应影响实验的安全高效制备有机化工品的系统。“空间毛细驱动微流控技术研究”实验旨在研究微重力环境下的液体毛细流动，以期提高颗粒分离、血液过滤和核酸扩增效果。“微重力环境下电解气体析出实验”研究微重力环境下气泡生长现象，探究其对皮下输送药物的贴附式柔性泵的影响。“微重力环境下淋浴器水珠形成研究”探究太空淋浴器喷射式喷头和



2020 世界载人航天发展报告

流控式喷头在出水状态方面的区别。“液珠在多孔表面上的惯性扩散与渗吸”实验在记录液珠扩散和渗吸过程的基础上，对更复杂的物体和材料上的毛细现象进行计算机模拟。“振动和水聚结状态下的惯性扩散”实验研究在微重力下变慢的液滴润湿固体的接触线过程。

NASA 支持开展了 4 项复杂流体新实验。系列“先进胶体实验”开展了 3 项新实验，利用共聚焦显微镜和时空 3D 成像技术观察双连续界面挤塞乳胶凝胶材料生成的 3D 结构，控制非球形胶体相位以制备功能性新材料，对颗粒悬浮液进行控制。“复杂的微生物系统”实验研究空间环境下长期存储的多组分液体老化机理。

NASA 支持开展了 2 项基于冷原子实验室的基础物理新实验，“玻色-爱因斯坦凝聚气泡动力学”实验将在球形或椭球形结构中制造玻色-爱因斯坦凝聚，“零重力少体和多体物理学”实验研究在不同条件下相互作用的超冷原子的动力学。

NASA 还支持开展了 1 项燃烧科学新实验。“密闭燃烧”实验研究狭窄空间的火焰蔓延及其传播原理，特别是火焰蔓延与周围墙壁之间的相互作用。

ESA 支持开展了 3 项新实验。系列实验“流体科学实验室软物质动力学”开展了 2 项新实验，“湿泡沫流体力学研究”实验研究微重力环境下含水和非水泡沫的行为和泡沫粗化原理；“致密颗粒介质的压实和声音传输”实验开展颗粒流变学研究。“材料科学实验室-批号 3a-ESA”实验聚焦金属合金定向凝固研究。

JAXA 支持开展的新实验“JAXA 多组分胶体簇实验”旨在研究制造光子材料所需的四面体胶体簇的结晶机理和最佳生产条件。此外，“等离子体晶体-4”“烈酒熟化”等 35 项实验继续开展。

(三) 生物学与生物技术实验

1. 研究概况

生物学与生物技术实验共计 56 项，其中新实验有 28 项。



2. 研究进展和新变化

NASA 共支持开展了 22 项新实验，其中微生物学方向开展了 9 项新实验。“微重力中不同材料和环境条件下生物膜形成、生长和基因表达的特征”实验旨在探究微生物与生物膜的相互作用机理。“空间探戈公司-微重力环境下用淡水藻生产类胡萝卜素虾青素”实验评估生物抗氧化剂的空间生产。“空间探戈公司-评估固氮蓝藻在微重力可持续农业系统中的潜在用途”实验评估固氮蓝藻生长在微重力可持续农业系统中的潜在用途以及空间环境下固氮作用的运行机制。“空间环境中噬菌体-细菌互作进化”实验旨在改进噬菌体疗法，建立对新出现的和顽固的病原体的控制策略。“生物探测有效载荷 1”实验验证用于基因组诊断（如测序）的机载纳米孔基因测序仪。“微重力下细菌的全基因组适应性”实验研究航天器内有哪些环境因素和过程对细菌的生长最为重要，将帮助控制或防止细菌生长。“空间技术和先进研究系统公司-生物科学-12”在空间环境下对三种不同的蛋白质折叠和降解情景开展研究，增进对与蛋白质聚集相关疾病的了解。“太空土壤健康：确定微重力对受控环境农业土壤稳定性的影响”实验研究空间环境相对于土壤聚集结构对真菌和细菌生长和活动的影响。“为偏远环境下的人类系统建立生物制造工艺”实验评估生物工程微生物链的生产以及偏远环境中生产关键任务材料所需的资源，有望为使用生物系统进行按需制造的新工具的开发带来启示。

NASA 支持开展了 5 项细胞生物学新实验。“用人体干细胞培养类器官”实验探讨空间环境中微重力对干细胞分化和复杂组织器官形成过程的影响。“利用器官芯片平台研究空间对人类肠道生理学的影响”实验以人类神经化肠道芯片为平台研究空间环境对人类肠道生理学的影响。“基于人类诱导多能干细胞的三维微生理系统在微重力下模拟心脏功能障碍”实验使用一种基于人类诱导多能干细胞的高通量三维微生理心肌模型，评估重力在人类心肌产生、心脏发育和心肌功能调节中的作用。“多用途变重力平台-03-微重力条件下人诱导多能干细胞产生的心脏祖细胞扩增成心肌细胞”实验旨在探究微重力环境是否会促进人体诱导性多能细胞衍生的心脏祖细胞的扩增和后续心脏细胞的生成。“利用微重力为癌症免疫疗法筛选癌选择性信使核糖核酸”



2020 世界载人航天发展报告

实验在微重力环境中测试健康和恶性细胞中的信使核糖核酸，筛选出的信使核糖核酸将被用于继续开发癌选择性信使核糖核酸。

NASA 支持开展了 4 项植物生物学实验。“豆科植物在微重力下的固氮作用”实验研究微重力环境对豆科植物固氮作用的影响，相关结果助力开发由豆科植物固氮生成的生物肥料。“太空细胞-01 实验”研究微重力环境对大麻和咖啡等植物基因表达和代谢物变化的影响。“光谱仪-001 实验”在微重力条件下用全色反射光和表观荧光对培养皿中的生物样品进行成像，以验证光谱成像硬件的功能。“PH-02：空间作物的营养价值和生长参数评估”实验旨在评估空间飞行和种植条件对萝卜生长、产量、成熟时间和新陈代谢的影响，为种植空间作物做准备。

NASA 支持开展了 3 项动物生物学实验。“微重力对昆虫病原线虫发现和杀死昆虫的能力的影响”实验结果有助于研究人员在地面提高有益线虫消灭农业害虫的能力。“啮齿动物研究-14-微重力对 12 小时生物钟的干扰”实验通过分析微重力对人体器官特别是肝脏的影响，获得微重力在基因层面对 12 小时生物钟以及对新陈代谢过程、内质网应激和动态生物能量代谢影响的知识。“啮齿动物研究-19-对广谱肌生长抑制素抑制剂防止肌肉流失和骨质流失的临床前评价”实验对治疗航天员空间飞行时的肌肉萎缩和骨质疏松具有重要意义。

NASA 开展的大分子晶体生长新实验“单克隆抗体结构和结晶动力学分析”旨在获得治疗性单克隆抗体的结晶，同时评估不同抗体结晶性的差异。

JAXA 支持开展了 4 项新实验。“日本实验舱微生物”实验旨在评估日本实验舱内部微生物环境并全面分析环境微生物群落，以减少微生物的潜在危害。“载人航天器饮用水微生物机载监测系统”实验旨在验证用于未来载人深空探索任务中的新型机载微生物监测系统。“微重力下转译控制的全基因组调查”实验采用核糖体图谱分析技术以全基因组调查的方式评估微重力下的转译变化。“解释单一细胞重力感应机理”实验通过测量空间飞行中动物细胞的响应来证明细胞重力感知假设，有望促进治疗肌肉萎缩和骨质增生症药物的研发。

ESA 支持开展了 2 项新实验。“轮虫-B1 实验”研究微重力和空间辐射



对近地轨道生物的累积效应，将揭示空间飞行对基因表达、新陈代谢和基因组稳定性的影响。“扦插”实验研究暴露于微重力环境对木本枝条在返回地面后扦插成活能力的影响，或可发现在地面无法合成的化合物。

此外，“JAXA 蛋白质晶体生长”“成骨细胞基因组学和代谢的重力调节”等 28 项实验继续开展。

（四）人体研究实验

1. 研究概况

人体研究实验共计 33 项，其中新实验有 7 项。

2. 研究进展和新变化

NASA 支持开展了 5 项新实验。“国际空间站同种异体半月板假体修复”实验研究利用 3D 生物制造设备打印半月板组织的可行性。“啮齿动物研究-23-微重力对眼部血管流体力学的影响”实验测量空间飞行前后小鼠的眼压、视网膜血流和视网膜的神经结构，有助于制定预防空间站神经-眼睛综合征的有效措施。“自主医疗支持软件验证”实验旨在验证采用软件手段指导空间站航天员为同事进行肾脏和膀胱超声波检查，并以此降低空间飞行中的医疗风险。“舒适度与人因因素：AstroRad 防辐射背心评估”实验旨在验证航天员在穿戴 AstroRad 防辐射背心时执行舱外活动的难易及舒适程度，以优化相关设计。“用于航天员异常长期效应系统的光离子探测器”实验通过测量国际空间站上宇宙辐射不同成分能谱，帮助航天员实时掌握辐射风险水平。

ESA 支持开展了 1 项新实验。“长时间空间飞行对 DNA 甲基化的影响”实验收集空间飞行前后的 5 个时间点上受试者的唾液和颊黏膜拭子样本，确定空间飞行如何影响表观遗传学。

JAXA 支持开展了 1 项新实验。“微重力下磷酸盐加速衰老机制”实验旨在验证微重力条件下骨骼中磷酸盐供应增加可能加速衰老这一假说，证明骨质疏松和骨量减少不仅是衰老的结果，还是引起衰老的原因。

此外，“气道监测”“NASA 生物标本库”等 26 项实验继续开展。



2020 世界载人航天发展报告

(五) 教育和文化活动实验

1. 研究概况

教育和文化活动实验共计 27 项，其中 14 项为新实验。

2. 研究进展和新变化

NASA 支持开展了 10 项新实验，涉及研究微重力对动物的影响、空间太阳能电力微波传输、空间暴露对 SD 存储卡的影响、卫星间通信、卫星脉冲等离子体推进器技术、艺术展示等丰富内容。

JAXA 支持开展了 3 项新实验，包括在日本实验舱内开设节目直播站、空间暴露刻板、开展机器人编程竞赛等。

ESA 的新实验组织开展年度编程竞赛。

此外，“太空故事时间”等 13 项实验继续开展。

(六) 地球与空间科学实验

1. 研究概况

地球与空间科学领域共开展了 22 项实验，其中 5 项为新实验，且均为对地观测实验。

2. 研究进展和新变化

NASA 支持开展了 3 项新实验。“Hyperangular 彩虹偏振仪立方体卫星”实验通过测量气溶胶大小和种类，以及云中水珠的大小和热力学相，研究气溶胶和云中颗粒物的性质。“Phoenix 立方体卫星”实验通过简单、低成本和低风险的方式研究城市热岛效应路径，为科研人员提供缓解热岛效应的数据。“海洋颜色光谱卫星”实验获取 433~866 纳米的中等分辨率海岸生态和海洋颜色光谱图像，监测海岸湿地。

JAXA 支持开展了 2 项新实验。“高光谱成像仪套件”实验是 NASA Terra 卫星上搭载的先进星载热发射和反射辐射仪的后继任务，可在较宽的波段范围内对目标物开展连续的光谱测量，分析目标物的特点和物理性质。“微卫



星集成标准成像仪实验”验证高分辨率光学双筒望远镜成像仪在轨运行性能，实验数据可帮助开发商用集成标准成像仪。

此外，“阿尔法磁谱仪-02”“量热仪型电子望远镜”等 17 项实验继续开展。

三、结束语

2020 年，国际空间站实现载人运行 20 周年。为庆祝这一伟大成就，NASA 总结了 20 年来国际空间站取得的 20 项科学和技术突破，ESA 列举了其开展的最受欢迎的 20 项人体研究实验。国际社会一致认同，国际空间站是持续在近地轨道开展大规模科学研究，验证深空探索所需的技术和能力，同时将空间研究成果源源不断造福地球的最为重要的在轨平台。

（中国科学院科技战略咨询研究院）

2020 年国外载人航天发射场发展综述

2020 年，美国国家航空航天局（NASA）继续开展肯尼迪航天中心地面发射设施设备的运行测试与完善，以及航天发射系统（SLS）火箭和猎户座飞船各系统在肯尼迪航天中心的装配与测试；俄罗斯国家航天集团在东方航天发射场第二阶段建造工程则全面推进安加拉火箭发射工位的施工以及超重型火箭发射工位的方案规划；商业航天发射场的改建与新建也在持续增扩。

一、肯尼迪航天中心继续进行各项地面设施设备的运行与匹配测试，以及 SLS 火箭和猎户座飞船的装配与测试

2020 年，用于保障“阿尔忒弥斯-1”（Artemis-1）任务的肯尼迪航天中心 39B 发射工位升级改造工工程已全部完成，主要地面设施设备已基本就位，具备了任务保障条件。NASA 探索地面系统部继续联合各承包商开展 2021 年首飞前的各项前期准备，包括地面设施设备的运行与匹配测试以及 SLS 火箭和猎户座飞船的装配与测试。

（一）组建问题解决专家团队备战 SLS 火箭首飞

NASA 组建了一个探索地面系统问题解决专家团队以积极备战发射前的各项工作，确保首飞任务成功。来自 SLS 火箭、猎户座飞船和探索地面系统等各个项目的近 100 名各种专业的专家和工程师将通过肯尼迪航天中心发射



控制中心 1 号点火操作间内的综合控制台，处理发射起飞前可能出现的各种问题，并给出可供决策的最终技术建议。由于 NASA 应用了近 490 项发射放行标准以及需对 12 000 个测量点位进行监测，因此需要对问题解决专家团队和发射操作团队进行大量培训演练，帮助各个团队建立对发射运载系统的信心，以使他们在碰到意外情况时能迅速做出应对。NASA 计划在 SLS 火箭和猎户座飞船首飞之前实施 20 次左右的任务发射模拟。

（二）进行 SLS 火箭活动发射平台行驶与发射台匹配性测试

2020 年 10 月 19 日，SLS 火箭活动发射平台再次由 2 号履带运输车驮载驶离垂直总装厂房，并于 20 日抵达 39B 发射台，随后由探索地面系统部和 Jacobs 公司对其进行发射台技术匹配性演练。活动发射平台与 2 号履带运输车组合体在 39B 发射台停留约两周，主要针对发射倒计时程序中各项操作的计时演示验证，包括激光校准、活动工作平台移动以进入火箭主芯级发动机段、火焰导流器的定位等。这是首次各单元的集成综合性测试。此外还对 ML 和发射台进行了一次彻底、全面的残渣和碎片冲洗清洁，目的是减少 SLS 火箭和猎户座飞船在发射中面临的风险。活动发射平台于 11 月初返回垂直总装厂房。

（三）进行 SLS 火箭低温推进剂加注模拟演练

地面探索系统部于 11 月 2 日联合 Jacobs 公司在肯尼迪航天中心发射控制中心的 1 号点火控制间进行 SLS 火箭低温液体推进剂加注流程的模拟演练。双方组成的 20 人低温推进地面与飞行应用软件团队在模拟加注演练中主要按照发射日当天的场景进行演示验证，密切监控相关技术性能，努力解决可能出现的任何问题。该团队中有许多经验丰富的航天飞机项目参与者，能提供大量实践经验，而新加入的年轻工程师们则为该计划目标实现展现了另一种不同的全新视角与思路，新老参与者相互合作、相互弥补。

（四）SLS 火箭助推器进入装配阶段

SLS 火箭固体助推器（SRB）发动机段组件于 6 月从诺-格位于犹他州的



2020 世界载人航天发展报告

生产厂通过铁路运抵肯尼迪航天中心，地面探索系统部团队随即将前端和后端组件移入旋转、处理与喘振厂房进行整体装配与测试。9月14日，地面探索系统部与诺-格在肯尼迪航天中心的垂直总装厂房高跨间进行全尺寸 SLS 火箭 SRB 模型组装演练。11月21日，地面探索系统部与诺-格及 Jacobs 公司正式启动 SRB 各段组件的装配。技术团队从11月19日开始进行 SRB 各段的装配，首先将每段组件从旋转、处理与喘振厂房移到垂直总装厂房，使用该厂房4号高跨间内的5台吊车将 SRB 各段移至新升级改造后的3号高跨间，然后在接下来的数周里从 SRB 底部的后端组件开始，逐一将 SRB 各段吊装到活动发射平台上。

（五）“阿尔忒弥斯-1”任务猎户座飞船进入射前的最后准备阶段

“阿尔忒弥斯-1”任务的猎户座飞船于3月25日通过“超级孔雀鱼”大型运输机运回肯尼迪航天中心阿姆斯特朗操作与检测厂房，NASA 与洛-马公司随后对其开展一系列发射前的最后测试与装配，包括飞船分系统的端-端性能验证、对飞船推进系统的泄漏情况进行检测、安装飞船的太阳电池阵翼、进行飞船关闭并对其飞行贮箱的附属设备进行加压测试。在完成上述测试与装配项后，洛-马将飞船移交给地面探索系统部，以启动飞船的地面操作程序。

地面探索系统部首先在肯尼迪航天中心的多有效载荷操作厂房内对猎户座飞船的其余贮箱进行燃料加注与加压，然后在发射中止系统厂房内将飞船与发射中止系统（LAS）进行装配。在完成 LAS 的安装后，地面探索系统部团队就将飞船运到垂直总装厂房，将其与 SLS 火箭进行对接组装。此后则是对 SLS 火箭与猎户座飞船的组合体展开综合性测试，以确认两者间的匹配性。

（六）运用 Sasquatch 软件预测猎户座飞船及硬件返回落点

NASA 在3月15日开展的第八次猎户座飞船返回溅落与搜救演练中，运用了一款称为“大脚野人”（Sasquatch）的软件对飞船及相关硬件的返回落点进行预测，以更好地完成回收搜救任务。约翰逊航天中心的一个4人小组驻留在回收舰船上，将卡纳维拉尔角和范登堡空军基地气象团队释放的8



个气象探测气球所采集的风数据与 Sasquatch 中有关飞船碎片的信息相融合并加以分析比较，以此判断碎片的落点分布情况，并重新部署回收舰船、搜救舟艇及直升机的位置。停放在回收搜救舰船上的直升机将根据 Sasquatch 团队提供的最新信息提前 1 小时起飞前往溅落区，并采集和提供飞船及硬件的下降与溅落图像。

（七）肯尼迪航天中心发射团队为其他任务提供有效保障

美国联合发射联盟 7 月 30 日从卡纳维拉尔角空军基地 41 号发射场通过宇宙神 541 型火箭成功发射了 NASA 火星 2020 项目的毅力号漫游车及独创研制的火星直升机。肯尼迪航天中心发射服务项目团队为该次任务发射过程中所面临的若干关键里程碑事件提供了高效保障，如飞行前准备状态评审（FRR）风险控制、FRR 发射管理协调、系统认证评审以及任务加注演练等，共完成了 247 项技术评审总结。此外，肯尼迪航天中心地面设施建造团队对佛罗里达州航天港集成与服务管理局解决有效载荷危险加注厂房和任务运营保障厂房等地面设施的修复、升级改造、维护问题所提供的技术保障，是该次发射任务取得成功的关键因素之一。

二、东方发射场进入安加拉火箭发射工位全面建造与超重型火箭发射工位方案确定阶段

2020 年，俄罗斯东方航天发射场第二阶段建设工程进入安加拉火箭发射工位的全面建造阶段。此外，超重型火箭发射工位建造方案经过数次论证也基本趋于明确。

（一）安加拉火箭发射工位的基础施工与设备装配同步进行

2019 年 10 月底的首场早冬大雪给东方发射场建设工程增加了难度，但俄罗斯国家航天集团做好了各项预防准备。乌拉尔车辆科研生产公司的低温硬件部 12 月将发射台供水系统运抵场区。俄罗斯国家航天集团地面航天基础设施运营中心（TsENKI）提前 6 个月安装完成 9 个 92 吨、容量 250 立方



2020 世界载人航天发展报告

米的液氧和液氢贮罐。进入 2020 年后，发射场建设工程逐步转入混凝土浇筑施工与设施设备金属构件安装的并行阶段。

1. 基础混凝土浇筑

2 月底开始发射工位第 5 区约 1 200 立方米混凝土浇筑，至此共开展了包括指挥控制掩体在内的 17 项地面设施施工。指挥控制掩体的进度提前 1.5 个月，液氢液氧存储设施进度则提前 2 个月。6 月 26 日开挖导流槽。

2. 地面设施设备安装

除了基础混凝土浇筑外，俄国家航天集团公司还从春季启动了一些发射台设施设备及管线的前期装配，主要涉及已基本完工的指挥控制掩体，此外加压气体存储设施的 95% 地上金属构件已运抵发射场以备安装。7 月中旬开始安装 4 个 23 吨、容量为 180 立方米的煤油储罐。俄国家航天集团公司总经理德米特·罗戈津 4 月表示，在东方发射场制定了严格措施，以防新冠肺炎疫情扩散，并同时承诺将在 2022 年完成该发射工位的最低保障度工程（但整个发射场区仍需 2 年多时间才能全部完工），并从 2023 年 1 月起进行各项设施设备的自主测试，以确保 2023 年的首次发射。

3. 地面设施设备的海路运输

俄罗斯国家航天集团首次通过海路方式运输安加拉火箭发射工位建造所需的大型发射部件及设备，后续针对超重型火箭的助推器等无法通过铁路或飞行运输的部件也将采用同样方式。海运主要路线是从境内远西北部白海海岸的北德文斯克市将约 2 000 吨重发射台座及导流器和 300 吨重真空舱装置运往发射场。“巴伦”运输船从北极圈地区穿过白令海峡驶入太平洋海域，抵达苏维埃港口后，再转由 R3-RSN 专用驳船沿阿穆尔河和结雅河抵达发射场附近的阿穆尔州气体加工厂的临时船坞，最后由运输拖车通过公路运抵发射场。一些重量小于 50 吨的发射台构件则通过铁路从北德文斯克市运往发射场。

截至 9 月 9 日，发射台的所有部件与设备均运抵发射场并卸载至工业园区的临时存储厂房内，真空舱装置则直接运到了技术区的火箭操作厂房内，而发射台主脐带与加注塔的基础梁早已安装在发射台上。俄罗斯国家航天集团随即展开了发射台的部件及设备安装。



（二）超重型火箭发射工位规划建造方案基本趋于明确

俄罗斯国家航天集团的新一代超重型运载火箭项目从 2019 年起取得了较大进展，包括拟在东方发射场建造的发射工位规划与设计方案，几经修改，基本框架现已趋于清晰。

确定地理坐标。

据 2019 年 2 月有关资料显示，该发射工位的地理坐标初步为北纬 $51^{\circ}53'$ ，东经 $128^{\circ}20'$ ，海拔高度 287 米。虽然俄罗斯国家航天集团 2020 年仍未确定最终的具体位置，但普京 4 月再次强调了须于 2028 年完成该发射工位的建造，而罗戈津则表示将在 2021 年开建超重型火箭发射工位。

火箭至发射台的运输与起竖方式。

俄进步国家科研生产航天火箭中心曾提出在东方发射场采用垂直组装与运输方式实施超重型火箭地面操作与发射，但这与目前俄罗斯传统的水平组装与运输方式完全不同，俄罗斯国家航天集团科学技术委员会常务委员会 2019 年 1 月 26 日召开会议，最终确定仍继续采用水平组装与运输方式。根据 2019 年 2 月中旬发布的超重型火箭设计说明，俄罗斯国家航天集团在发射场区内为移动运输车设计了 2 条相隔 12 米的运送轨道，轨距宽 1 520 毫米，转弯半径不小于 1 000 米。主要用于推进剂运输的其他轨道的转弯半径为 250 米，后又修改为 350 米。火箭至发射台的运输与起竖方案曾一直存在着争议：一种方案是类似质子火箭的，即活动运输车将火箭运至发射台，然后将火箭移入固定式起竖车上以进行火箭起竖；另一种方案是类似联盟、N1 和能源火箭的，即将活动运输车与起竖车合并设计成一个单体移动装置。

地面设施设备的布局规划。

发射工位地面设施布局也面临两种选择：一种方案是使地面设施布设微型化、数量最少化，减少发射设施之间的联接与动力保障，降低低温推进剂的绝对蒸发损失，仅在较远处保留一个液氢存储设施，以避免在出现意外爆炸事故时影响到发射场区的其他设施；另一种方案是建造 2 个发射台，分别用于超重型火箭和联盟 5 火箭的发射，但可共享包括指挥控制掩体等在内的主要地面保障设施设备，而这将是自苏联以来首次在同一发射工位建造 2 个



2020 世界载人航天发展报告

不同的发射台，其主要优势在于可采取阶段性建设工程，而通用型保障设施设备可同时用于常态化联盟 5 火箭发射与特殊性超重型火箭发射。俄罗斯国家航天集团几经权衡与折中，在 2019 年底形成了最终的地面设施设备布局方案，即设计 2 个发射台，但要减小各项地面设施之间的距离，以缩短动力与通信线路以及减少低温推进剂损耗。此外，有关地面设施设备的基础设计原则，要求运送液氢液氧的各种管线不能与公路和铁路轨道形成交叉，以确保在出现发射中止后能使推进剂安全地回流至发射台的储罐内。公路的布设原则是能保证发射台的辅助性操作，如可使人员进入启动发动机的区域。由于火箭发射升空后主要向东飞行，因此指挥控制掩体设在 2 个发射台的西侧。此外，还在发射场区的所有厂房内布设了一套特殊的主动通风系统，通过“清洁通风”和“全隔离”两种模式用于降低来自氮、氦等加压气体以及氟氯烷与液氢蒸汽的危险性浓度。

（三）东方发射场建设资金仍面临一定困难

据俄罗斯有关媒体报道，东方发射场的建设发展一直受困于不断攀升的建设成本及其他经济问题。2018 年的建设经费为 22.49 亿卢布，2019 年为 27 亿卢布，2020 年为 30.52 亿卢布。

截至 2020 年 2 月，俄罗斯国家航天集团共失去了约 350 亿卢布（约 4.758 亿美元）资金，其中有 200 亿卢布为应还的第一阶段建设工程债务，目前被法庭冻结。俄罗斯航天局副局长马克西姆·奥夫钦尼科夫承诺在未来两年内付清剩余的 150 亿卢布。TsENKI 主管安德烈·奥赫洛普科夫 2 月 25 日接受媒体采访时表示，因法庭案件审理原因，俄罗斯国家航天集团公司无法获得第一阶段建设工程所划拨的 224 亿卢布资金，他提出两种解决方案：一是再从联邦政府获取同样数额的资金；二是将这笔缺款划拨到第二阶段建设工程中。奥赫洛普科夫认为被法庭冻结的资金将会随着案件审理结束而返还给航天局，并强调第一阶段未完工的地面设施后续还将保障安加拉火箭发射工位的运行。

奥赫洛普科夫表示，在东方发射场第一阶段建设工程所涉及的 19 项地面设施中，其中有 6 项已被俄罗斯国家航天集团认定为完工，而居住区和推



进剂存储设施的建设工程则重新签发给喀山公司，TsENKI 则继续实施其他地面设施的建造，包括公路、铁路、2 个工业园存储区、气象与通信设施，并承诺将在 2021 年或 2022 年完成全部主要设施的建造。

三、商业航天发射场的改建与新建数量持续增扩

（一）哈萨克斯坦批准在拜科努尔建造拜捷列克发射工位

哈萨克斯坦 1 月批准了该国与俄罗斯 2014 年签定的关于将拜科努尔发射场原天顶 M 火箭发射工位改建为拜捷列克发射工位及配套地面设施协定的修正与补充协议。11 月启动该发射工位的勘察与建造，计划于 2022—2023 年间投入使用。

（二）SpaceX 拟为星船飞船建造海上航天港

SpaceX 公司在 2020 年针对新型星船飞船研制浮动式发射与着陆平台，这意味着该公司未来火星探索任务可能不从陆地上实施。根据马斯克的推文显示，海上航天港将会由石油钻井平台改建而成，乘客将通过“超级环”真空舱运输系统抵达海上航天港。由于发射与着陆所产生的噪声不小，因此海上航天港将不会沿着海岸线布设，而是离海岸足够远，以免干扰到居住密集区。人们可乘船进入距海上航天港数千米的位置进行观看。

（三）NASA 在肯尼迪航天中心新建 48 号小型火箭发射工位

NASA 拟在肯尼迪航天中心 39A 发射工位的南面约 1.609 千米处建造一个编号为 48 的新发射工位，以适应具备任务周转时间非常短的新型、低成本的小型发射系统。该工位的简洁式、通用型混凝土发射台约 13.7 米×16.4 米，高约 1.22 米。场区整体布局设计非常不拘一格，没有配置很多基础设施，能使任务用户节省大量任务费用，同时意味着可供多个商业发射服务商和商业研究与开发机构在此开展所需的试验与发射运营。每位用户只需使用各自的车辆将任务所用的电源、水、保障设备及通信设施运抵发射场区，完成有



2020 世界载人航天发展报告

关任务后再自行运离，将简洁式发射台留给下位用户。这也是该 NASA 将 KSC 转型为多任务、多用户的多用途发射场的发展战略之一。

（四）美国佛罗里达航天港向联邦航空局申请发射运营许可

佛罗里达州泰特斯维尔-可可机场管理局（TCAA）向美国联邦航空局商业航天办公室提出申请将一个名为“航天海岸区域机场”转型为航天发射港，并为获取所需的运营许可做准备。TCAA 拟建的发射场位于肯尼迪航天中心的西面，将设有一所 37 200 平方米的运载器生产厂房、一座存放可重复使用运载器的机库、燃料加注区、滑行道、停机坪以及其他需完善的配套基础设施。该发射场将主要用于水平起飞与降落型的亚轨道可重复使用运载火箭的飞行任务，年发射次数预计将达 50 次。

（五）维珍轨道选定日本大分机场作为商业航天发射场

维珍轨道公司 2020 年 4 月 2 日宣布与日本全日空航空公司（ANA）和日本航天港协会合作，将日本九州岛上的大分机场选定为“运载器一号”空中发射系统的可用发射场。大分机场设有一条 3 000 米长的跑道。维珍公司目前正与大分县政府联合开展相关技术论证。

（北京特种工程设计研究院）

专题篇



美国 NASA 2021 财年载人航天 预算与发展计划解析

2021 财年，在深空探索方面，美国 NASA 继续为 SLS 重型运载火箭、猎户座飞船、探索地面系统研制申请所需的经费，并为实现提前登月目标向国会申请大额经费，以实现载人月球着陆系统的研制；在近地轨道运输方面，NASA 继续推进乘员与货物运输服务采购以及近地轨道商业开发项目。本文通过梳理上述载人航天项目的 2021 财年预算情况及其发展计划，分析美国载人航天的发展重点和方向。

2020 年 2 月，NASA 公布了 2021 财年预算案，预算总额为 252.46 亿美元。其中，载人航天预算项目主要集中于深空探索以及近地轨道与航天飞行操作两个领域，总预算为 129.49 亿美元，占到了 NASA 总预算的 51% 左右，其重要地位可见一斑，具体预算情况见表 1。本文主要对以上两个领域中与航天运输相关的项目进行分析，包括深空探索系统和近地轨道航天运输项目。

表 1 深空探索系统以及近地轨道航天运输预算（单位：亿美元）

预算项目	2019 财年 实际投入	2020 财年预算 (法案通过)	2021 财年预算 (申请)
深空探索系统	50.448	60.176	87.617
探索系统研制	40.868	45.826	40.423
猎户座飞船	13.500	14.067	14.005



续表

预算项目	2019 财年 实际投入	2020 财年预算 (法案通过)	2021 财年预算 (申请)
SLS 项目	21.440	25.859	22.571
探索地面系统 (EGS)	5.928	5.900	3.847
探索研究与开发	9.580	14.350	47.194
先进探索系统	3.489	—	2.582
先进地月空间与表面能力	1.321	—	2.121
“门户”	3.320	—	7.393
载人着陆系统	—	—	33.698
人体研究	1.450	—	1.400
近地轨道和航天飞行操作	46.404	41.402	41.873
国际空间站	14.903	—	14.007
航天运输	21.097	—	18.778
乘员与货物计划	18.956	—	17.781
商业乘员计划	2.141	—	0.997
空间与飞行支持	10.004	—	7.587
21 世纪航天综合发射设施	0.145	—	—
空间通信和导航	6.025	—	5.060
载人航天飞行操作	1.331	—	0.899
发射服务	0.884	—	0.919
火箭推进试验	0.600	—	0.476
通信服务项目	1.019	—	0.234
近地轨道商业开发	0.400	—	1.500
总计	96.852	101.578	129.49

一、深空探索系统

深空探索系统是 NASA 围绕深空探索开展的核心任务领域，包括探索系统研制和探索研究与开发两部分内容，为深空探索提供所需系统和能力，主



要包括 SLS 重型火箭、猎户座载人飞船、探索地面系统（EGS）、月球“门户”以及载人月球着陆系统项目。2021 财年，NASA 为该领域申请的预算总额约为 88 亿美元，相比 2020 财年实际拨款增加了 27.441 亿美元，增幅为 45.6%。

（一）航天发射系统

航天发射系统（SLS）包括运载火箭研制和 SLS 项目集成与支持两部分，2021 财年的总预算为 22.571 亿美元，比 2020 财年拨付预算减少了 3.288 亿美元，降幅为 12.7%。

目前，包括固体助推器、级间段、过渡型低温上面级、飞船支架在内的 SLS 首火箭组件都已经运至肯尼迪航天中心，进行火箭总装前的检测、操作演练等准备工作。SLS 火箭能否在 2021 年进行首飞，关键在于芯级试验进度。2020 年初，NASA 将首枚芯级安装至 B-2 试车台上，随后组织开展系列芯级试验工作，包括模态试验、电子系统试验、失效保护系统试验、主推进系统组件试验、推力矢量控制系统试验、发射倒计时演练、推进剂加注与泄出演练，以及 4 台 RS-25 发动机联合试验等 8 项内容。

对于 NASA 来说，2021 财年将是令人振奋的一年，计划执行“阿尔忒弥斯-1”环月任务。在发射之前，NASA 将完成该任务的设计认证审查和初步飞行准备评审。此外，在完成 SLS 首火箭的交付之后，NASA 及相关单位将把工作重心转移至后续 SLS 任务所需系统的研制以及降低 SLS 发射成本上来，具体包括：1) 完成“阿尔忒弥斯-2”任务的 SLS 火箭芯级组件、发动机及发动机段尾部连接件、过渡型低温上面级和飞船支架的制造与交付，并开始芯级组装以及飞行准备分析；继续进行“阿尔忒弥斯-3”任务 SLS 火箭硬件的制造，并启动“阿尔忒弥斯-4”火箭子级以及级间段的生产合同签订工作。2) 推进“创新技术研发项目”“先进助推器项目”“一次性 RS-25 发动机改进计划”等项目，为后续 SLS 型号储备相关技术。3) 落实固体助推器、芯级、探索上面级等系统批量采购合同，以批量生产实现产品的成本降低。



2020 世界载人航天发展报告

(二) 猎户座飞船

猎户座飞船项目包括飞船研制、猎户座飞船项目集成和支持两部分，预算分别为 13.9 亿美元和 1 050 万美元，总计 14.005 亿美元，与 2020 财年实际拨款基本一致。

2020 财年，主要完成乘员舱（CSM-1）的热真空、声学以及电磁干扰试验，开展软件试验以及乘员舱结构试验。2021 财年，完成 CSM-1 与支架以及 LAS 发射终止系统等的组装，之后完成飞船与 SLS 火箭的集成；开展飞行后分析，评估飞船性能；完成“阿尔忒弥斯-2”任务所需软件的交付；完成第二艘猎户座飞船服务舱和乘员舱的制造、装配、试验和集成。

(三) 探索地面系统

NASA 在 2021 财年为探索地面系统申请的预算为 3.847 亿美元，其中系统研制预算为 3.77 亿美元，系统集成与支持项目预算为 770 万美元。与 2020 财年拨付的经费相比，本财年预算减少了 2.053 亿美元，降幅 34.8%。

2019 至 2020 财年，NASA 探索地面系统团队完成了多项地面系统试验。首先，团队对 1 号活动发射平台进行了多项关键试验，包括脐带臂摆臂、环境控制、液压、电气、模态等试验以及转运演练。其次，完成了 39B 发射工位的系列噪声抑制系统试验，检验了该系统在火箭点火和起飞阶段的噪声及振动抑制性能；并进行了低温推进剂从储罐经管道到达活动发射平台脐带设施的推进剂输送试验，再次验证了地面系统的性能。另外，地面团队还通过芯级和助推器全尺寸模拟件，模拟了子级转移、起竖、安装、组装等操作，对芯级和助推器的运输以及操作流程进行了演练，也验证了地面设施的性能。2021 财年，探索地面系统团队的工作重心是为首飞火箭、飞船系统的总装与发射做好充分准备，包括组装演练、发射倒计时演练等。此外，地面团队还将积极进行地面系统的升级改进，主要开展新型液氢储罐以及 2 号活动发射平台的建造，为首飞之后的 SLS 首次载人与登月飞行任务奠定基础。



（四）月球“门户”空间站

月球“门户”是一个绕月飞行空间站，计划为载人深空探索任务提供着陆系统各舱段的对接平台以及燃料加注、后勤保障、科学研究等服务，助力实现美国载人深空探索的可持续性发展。

为了满足 2024 年载人重返月球的目标，NASA 将先期建设最简版月球“门户”，主要由电力和推进模块与居住舱组成。2021 财年，NASA 为该项目申请了 7.393 亿美元，用于完成以下重点工作：完成“门户”的初步设计评审；继续与麦克萨技术公司合作，开发 PPE 电力与推进模块；继续与商业伙伴合作，为“门户”居住、电子、飞行软件、生命支持、在轨燃料加注等方面提供技术支持；完成 HALO 居住舱的关键设计评审；完成第一个商业运输模块的初步设计评审。

对于缩减版“门户”的功能，NASA 目前没有明确表示其将用于 2024 年载人登月任务，但是对于可持续月球探索，“门户”将是一个必须的组成部分，可以助力实现燃料在轨加注、着陆器部件的重复使用以及火星载人任务模拟等。未来，NASA 将依靠国际合作伙伴的参与，将“门户”发展成规模更大、能力更强的深空平台，将为人类在轨停留以及同一次阿尔忒弥斯任务中航天员反复到访月球以及飞往火星铺路。

（五）载人月球着陆系统

载人月球着陆系统（HLS）是 NASA 实现“阿尔忒弥斯”计划不可分割的一部分，将依靠商业伙伴进行研制，实现从 2024 年开始人类往返月球表面的目标。2021 财年，NASA 为该项目申请了近 34 亿美元的预算经费，将用于系统研制。相比 2020 财年，该项目的预算额有了很大程度的增加。

2020 年 4 月底，NASA 向由蓝源、达因技术以及 SpaceX 公司牵头的三支团队签发了为期 10 个月的载人月球着陆系统项目设计论证合同，金额为 9.67 亿美元。目前，三支团队分别提出了“整体式着陆飞行器”（ILV）、“达因技术载人着陆系统”（DHLS）和“超重-星舰”运输系统方案，并在研制上取得了一定的进展。待 10 个月合同期满，NASA 将开展一次续约评审，



2020 世界载人航天发展报告

选择其中最有可能实现 2024 年载人登月任务的方案，而另一家或两家公司也将可能被留下来开展后续着陆器的研制工作。而 2021 财年，NASA 将主要开展着陆系统的设计和评审工作。

二、近地轨道航天运输

近地轨道航天运输项目主要包括“乘员与货物计划”“商业乘员计划”（CCP）和近地轨道商业开发项目，预算分别为 17.781 亿美元、9 970 万美元和 1.5 亿美元。

（一）乘员与货物运输采购

为了满足国际空间站的乘员与货物运输需求，NASA 申请了近 18 亿美元，从诺-格公司、SpaceX 公司、内华达山脉公司以及波音公司采购货运和载人发射服务。

在货物运输方面，NASA 已经授出了第二轮货物运输合同（CRS-2），以满足 2020 年之后的国际空间站货物运输任务。在 CRS-2 合同下，SpaceX、诺-格和内华达山脉三家公司将至少完成 6 次发射服务。而在 2021 财年，这三家公司将分别执行 2 次、2 次和 1 次货物发射。

在乘员发射服务方面，NASA 目前向俄罗斯购买服务。2021 财年，美国将完全摆脱俄罗斯，全面采用本国的载人航天运输系统。其中，波音公司和 SpaceX 公司都至少会进行 1 次载人发射服务。

（二）商业乘员计划

商业乘员计划（CCP）的预算为 9 970 万美元，用于为美国商业载人运输系统的研制提供经费支持。因为波音公司和 SpaceX 两家公司的载人运输系统研制计划已经接近尾声，其项目预算也仅仅保持在 1 亿美元左右，远低于此前的 8 亿~10 亿美元的规模。

其中，SpaceX 公司以其猎鹰 9/载人龙飞船为 NASA 提供载人发射服务，在 2019 年和 2020 年成功进行了该系统的首次无人试验、首次载人试验飞行



和首次载人任务；而波音公司以其宇宙神 5/星际客机进行载人发射，在 2020 财年进行了一次轨道飞行试验，但未取得完全成功。目前，波音公司计划自筹经费在 2021 财年开展第二次无人试飞。

（三）近地轨道商业开发

近地轨道商业开发项目最初是在 2019 财年预算申请中增加的，申请金额为 1.5 亿美元，但并未获得批复。2020 和 2021 财年，NASA 都为该项目申请了 1.5 亿美元。

2019 财年，NASA 通过公开竞争开发商业近地轨道空间站，满足长期发展需求并确保其在国际空间站过渡期间持续拥有近地轨道运营能力。2020 财年，NASA 主要开展了近地轨道商业平台方案的选择以及开发计划的状态评估。2021 财年，NASA 继续开发 ISS 商业模块，激励建立商业伙伴关系，推进先进技术的发展，促进对近地轨道经济产品和服务的需求增加。

三、结论

（一）深空探索能力是美国的发展重点

美国在小布什执政期间就提出了“太空探索新构想”，并制订“星座计划”以实现载人重返月球。奥巴马执政后，美国政府终止“星座计划”，提出了从小行星到火星的载人航天发展路径。而到了特朗普时期，取消了奥巴马时期的“小行星重定向任务”，重启载人重返月球计划，但仍然将载人火星探索作为长远发展目标。

从奥巴马时期明确 SLS 重型火箭、猎户座载人飞船和探索地面系统研制以实现深空探索目标开始，美国政府每年都在给这三大探索系统提供研制经费。其中，SLS 火箭项目是政府在航天运输领域的最大投入，到 2020 财年底累计投入了约 174 亿美元，而且自 2016 财年以来，国会的实际拨款额都高于 NASA 的申请额，年投入都保持在 20 亿美元以上；在探索地面系统上，NASA 所需要的研制经费基本都能够获得支持，近 4 年在该项目上的实际拨



2020 世界载人航天发展报告

款还远远高于申请额。此外，2020 财年以来，特朗普政府为了实现提前登月目标，在预算案中暂停 EUS 探索上面级和 2 号活动发射平台的研制，但并未获得国会同意。国会的最终拨款法案明确提出要为这两个项目提供所需的经费，因为使用高性能探索上面级的 SLS 改进型是载人火星等深空探索任务必不可少的组成部分。从深空探索项目的预算及实际拨款来看，美国政府始终将能力发展放在深空探索任务的第一位，确保美国的长远深空探索目标不会受到政府更替的影响，而能够持续向前发展。

（二）“阿尔忒弥斯”计划的实施面临着经费不足的考验

2019 年初，美国政府提出提前 4 年实现载人重返月球的目标。随后，NASA 发布《飞向月球：NASA 月球探索战略计划》和《NASA 月球探索项目概述》，计划依靠商业和国际合作途径，发展主要由 SLS 火箭、猎户座飞船、探索地面系统、月球“门户”和载人着陆系统组成的深空探索框架，在 2024 年将美国航天员送上月面，2028 年实现对月球的长期可持续探索，最终为载人探火奠定能力基础。

“阿尔忒弥斯”计划的实施需要大量资金，截至 2020 财年底，美国政府为 SLS 火箭、猎户座飞船、探索地面系统、月球“门户”以及载人月球着陆系统等五大关键系统累计投入了 314 亿美元。2021 至 2025 财年，相关系统总预算为 280 亿美元，而此前提出的“星座计划”预计耗资 1 000 亿美元。以“星座计划”为参考，目前“阿尔忒弥斯”计划的预算远远不够。而且，“载人月球着陆”系统是该计划的重要组成部分。为了加快研制进度，NASA 在 2021 财年预算中为其申请了 33 亿美元，但这并未获得国会两院的批准，最终拨款法案也仅仅提供了 8.5 亿美元的研制经费。美国加速载人登月计划所需的全部研制经费尚未落实，未来仍将面临巨大的考验。

（三）美国近地轨道载人航天将迎来商业化发射与运营

目前，NASA 已通过与诺-格和 SpaceX 等商业公司的合作，形成了国际空间站货物往返运输能力，且内华达山脉公司也有望从 2021 财年开始执行近地轨道货物运输任务。而在商业乘员运输方面，NASA 及其合作伙伴——



波音和 SpaceX 公司近年来正在持续推进商业载人运输系统的研制工作。基于两家公司的首次无人试飞以及载人试飞，NASA 计划在近 1 亿美元预算的基础上，在 2021 财年完成商业乘员运输能力认证，从而实现美国载人航天能力的回归。届时，NASA 将通过商业运输系统成功搭建美国近地轨道的货物和乘员运输能力，为近地轨道商业活动的开展和运营奠定基础。

在 2021 财年预算中，NASA 仍然为近地轨道商业化开发项目申请了 1.5 亿美元，不过最终拨款法案仅提供了 1 700 万美元，用于继续开发基于国际空间站的商业化平台，旨在基于商业公司打造后国际空间站时代近地轨道商业化运营模式，催生空间经济以及先进技术的可持续发展。

(北京航天长征科技信息研究所)

俄罗斯载人探月计划进展综述

继承苏联衣钵的俄罗斯早已开始考虑研究与开发月球，在 2012 年制定的《2030 年前航天活动发展战略》中就包括了考察和开发月球表面的内容，并启动了雄鹰飞船的研制和超重型运载火箭的设计工作。由于近年来俄罗斯国内经济不景气原因，造成一些登月项目向后推迟。然而，俄罗斯国家航天集团总裁罗戈津在 2020 年的最后一天发表新年贺词之际，正式对外宣布 2030 年俄罗斯将实现载人登月的目标。

2021 年 10 月“月球-25”探测器的发射，俄罗斯载人探月计划将全面展开。

一、俄罗斯的三阶段载人探月计划

根据 2014 年 5 月俄罗斯科学院、俄罗斯航天局（现为俄罗斯国家航天集团）、莫斯科大学共同起草的月球探索计划，首位俄罗斯航天员拟定于 2030 年登月，并在 21 世纪中叶前建立有人居住的月球科研试验基地。2018 年 11 月 28 日，俄罗斯科学院在莫斯科召开航天总结大会，会上对外公布了月球探索方案，俄罗斯 2040 年前的月球探索将分为“月球进发”“月球前哨”“月球基地”三个阶段，第一阶段部分内容（包括向月球发射 4 个无人月球探测器）已列入了 2016—2025 年的俄联邦航天计划内。



（一）“月球进发”阶段（2021—2025年）

这一时期主要完成以下任务：利用国际空间站，研究和验证一切与月球探索有关的前沿技术；建造月球空间站基础舱，飞行测试新一代载人雄鹰探月飞船；发射“月球-25/26/27”号月球探测器；深入了解和研究月球的地形、地貌；细化下一阶段载人探月计划。俄罗斯月球空间站很有可能是以国际空间站俄罗斯舱段某些舱为核心舱来建设，包括2021年发射的节点舱和2022年发射的科学能源舱以及新一代雄鹰载人飞船。

根据发射计划安排，俄罗斯计划2021年发射“月球-25”着陆探测器，2024年发射“月球-26”轨道探测器（“月球资源-1”号），在月球轨道上研究和探测月球，获取相关数据，并以此为基础制定下一步月球探索战略方案。2027年发射“月球-28”探测器（“月球土壤”号），主要任务是将月球南极土壤运回地球供科研人员研究。

（二）“月球前哨”阶段（2026—2035年）

这一时期主要完成以下任务：2026—2030年期间，在月球轨道上部署通信卫星；研制月球着陆器；2029年实现载人绕月飞行；2030年之后实现载人登月，航天员在月球表面工作14天；研制、建造并部署前期月球基地基础设施。

2035年向月球发射重型月球车，以便于航天员在月球表面远距离移动并进行月球勘测，同时展开“月面驾驶验证”试验，俄航天员驾驶月球车进行远距离月球探测以及测试机器人系统，并开始完善和改进月球基地设施。

（三）“月球基地”阶段（2035年之后）

这一时期主要完成以下任务：完善月球基地科研设施建设，在月球表面部署两个天文观测站（无线电天文台和宇宙射线研究观测站）；月球基地建设全面展开；冰水资源开采，并以此为基础制造氢氧燃料；建造防辐射庇护所。

为了便于月球工作人员进行定位和导航，俄罗斯2036—2040年期间在



2020 世界载人航天发展报告

月球轨道上部署月球卫星定位导航系统，该系统包括月球轨道上的卫星网络系统和地球轨道上的卫星导航系统，实现地-月之间自由通信，俄罗斯月球计划相关的发射任务时间表见表 1。

表 1 俄罗斯月球计划相关的发射任务时间表

序号	日期	探测器	运载火箭	发射场	无人/载人	任务
月球计划第一阶段（“月球进发”）						
1	2021.10.01	“月球-25”	联盟 2-1b	拜科努尔	无人	研究月球南极着陆技术
2	2024.11.13	“月球-26”	联盟 2-1b	东方	无人	月球遥测，确保月球通信
3	2025.08	“月球-27” 主着陆器	联盟 2-1b	东方	无人	研究月球基地建设技术以及月壤和外层大气情况
4	2027 年	“月球-28”	安加拉-A5	东方	无人	月壤取样（包括冰晶）并运回地球
5	2028 年	“月球-29”	安加拉-A5/KBTK	东方	无人	把“月球车”运抵月球表面
6	2030 年后	“月球-30”	待定	东方	无人	
月球计划第二阶段（“月球前哨”）						
1	2028 年	雄鹰载人飞船	叶尼塞超重型运载火箭	东方	无人	无人绕月飞行
2	2028 年	月球空间站轨道舱	叶尼塞超重型运载火箭	东方	无人	向月球轨道发射空间站建设舱
3	2029 年	雄鹰载人飞船	叶尼塞超重型运载火箭（双次发射）	东方	载人	载人绕月飞行，月球起飞/着陆器的试飞，与雄鹰载人飞船的对接，月球起飞/着陆器的无人着陆测试
4	2030 年	月球起飞/着陆器和雄鹰载人飞船	叶尼塞超重型运载火箭（双次发射）	东方	载人	航天员 3 人乘组登陆月球表面，工作 14 天
5	2034 年	月球货运飞船（携带月球基地基础舱）	叶尼塞超重型运载火箭	东方	无人	向月球发射月球基地建设核心舱
6	2034 年	月球起飞/着陆器和雄鹰载人飞船	叶尼塞超重型运载火箭（双次发射）	东方	载人	航天员乘组登陆月球表面，开始建设月球基地
7	2035 年	月球货运着陆器（携带大型月球车）	叶尼塞超重型运载火箭	东方	无人	将重型月球车运抵月球表面，该车具有对接舱口
8	2035 年	月球载人着陆器/雄鹰载人飞船	叶尼塞超重型运载火箭（双次发射）	东方	载人	航天员登陆月球表面，月球车驾驶及其移动性能测试，机器人系统测试

续表

序号	日期	探测器	运载火箭	发射场	无人/载人	任务
月球计划第三阶段（“月球基地”）						
1	2035年后	月球货运着陆器（携带能源舱）	叶尼塞超重型运载火箭	东方	无人	发射移动式能源舱
2	2035年后	月球载人着陆器/雄鹰载人飞船	叶尼塞超重型运载火箭（双次发射）	东方	载人	航天员登陆月球，继续开展月球基地的建设任务
3	2035年后	月球货运着陆器（携带实验舱）	叶尼塞超重型运载火箭	东方	无人	向月球发射实验舱
4	2035年后	月球载人着陆器/雄鹰载人飞船	叶尼塞超重型运载火箭（双次发射）	东方	载人	航天员乘组登陆月球表面，继续开展月球基地的建设和科学实验任务

二、俄罗斯载人登月各分系统研制进展情况

（一）超重型运载火箭

根据俄罗斯月球发射计划安排，第一阶段将使用联盟 2-1b 和安加拉-A5 型重型运载火箭。月球计划第二阶段将使用安加拉-A5B 型重型和叶尼塞超重型运载火箭。2019 年 12 月 20 日通过了超重型运载火箭的初步设计方案，首次发射定于 2028 年，主要任务是将雄鹰载人飞船送至月球轨道，完成绕月飞行，并返回地球。

在俄罗斯新版航天计划中列入了重复利用的运载火箭甲烷燃料发动机新技术研发项目。俄罗斯目前已经开始研制甲烷发动机，与液氧煤油发动机不同，使用的是一种环保能源，无需再次提纯，并且因甲烷火箭的零部件数量要减少一半，火箭可靠性将会大大提高。未来，甲烷燃料的运载火箭将会取代联盟运载火箭。

安加拉-A5 型火箭是苏联解体后研制的第一枚重型运载火箭。俄罗斯国家航天集团拟采购 3 枚安加拉-A5 型重型运载火箭（第 1 枚于 2021 年 5 月交付，当年 8—12 月期间择机在东方发射场发射，第 2 枚 2024 年交付，第 3



2020 世界载人航天发展报告

枚 2025 年交付)。而俄罗斯现又开始研制安加拉-A5M 型运载火箭,是安加拉-A5 的升级改进型,A5M 型运载火箭的推力提高了 10%,拟于 2024 年首次发射。

叶尼塞超重型运载火箭是俄罗斯将要研制的首枚用于深空探测的超重型运载火箭,使用液氧液氢燃料,原计划于 2028 年首次发射。但俄罗斯 2020 年 12 月决定利用安加拉-A5B 型运载火箭完成先期载人登月任务,因为该火箭要比叶尼塞超重型火箭大约节省四分之三的燃料。然而,如果需要进一步深入开展载人探月项目,则超重型运载火箭是必不可少的。

(二) 载人飞船

载人飞船是探月运输系统最主要的部分,俄罗斯未来主要以在研的新一代载人雄鹰飞船向月球运送航天员,但现阶段也在研究联盟载人飞船的升级改造,让其成为雄鹰飞船的备份。

1. 联盟载人探月飞船

2018 年 6 月,俄罗斯国家航天集团总裁罗戈津称,在俄罗斯新一代载人雄鹰飞船研制期间,很有可能对当前的联盟载人飞船进行升级改造,使其具备月球飞行条件。实际上,联盟载人飞船也是为实现苏联时期的载人登月计划而设计研制的。

2019 年 3 月,罗戈津向媒体表示,联盟探月飞船将具备增强的热防护和防辐射能力(又增加了一层防护外壳),将会以两次发射方式完成月球飞行,即首先借助联盟运载火箭发射联盟载人探月飞船,进入地球轨道并临时停靠国际空间站;然后利用安加拉重型运载火箭发射深空拖船,联盟载人探月飞船在国际空间站与深空拖船完成对接后,再一起飞往月球,完成任务后返回地球。

2. 新一代雄鹰载人飞船

俄罗斯新一代雄鹰载人飞船定于 2022 年进行首次无人飞行试验,2023 年完成无人飞行并与国际空间站对接,2024 年实现首次与国际空间站对接的载人飞行。2026—2028 年期间,雄鹰飞船完成无人飞月,2029—2030 年期



间实现载人飞月，并利用月球车对月球全面勘测、研究，2030 年实现俄罗斯首次载人登月并执行 14 天月面考察任务，同时让着陆舱发挥月球基地基础舱的功能，之后每年进行一次载人登月考察任务。

2019 年 1 月 30 日，俄罗斯能源火箭与航天公司提交了一份关于新一代载人雄鹰飞船的飞月方案，雄鹰飞船和月球着陆器（包括着陆舱和升起舱）均由安加拉-A5 重型运载火箭发射，首先发射月球着陆/起升舱，安加拉-A5 运载火箭将其送至月球轨道（距月球表面约 100 千米高度），并绕月飞行 6 个月的时间等待雄鹰飞船。6 个月后，月球着陆/起升舱和飞船完成对接，航天员进入月球着陆/起升舱，并登陆月球表面，在月球表面开展考察工作。考察任务结束后，航天员进入起升舱，返回到月球轨道并与雄鹰飞船对接后回到飞船内，雄鹰飞船与起升舱分离，返回地球，在返回舱与飞船分离过程中，依靠与地球大气层的阻力制动以降低飞行速度，并重新弹回太空，然后二次再入大气层，并最终降落到地面。

为实现绕月飞行，拟采用双发射方案，也就是第一次发射将雄鹰飞船送入地球轨道，第二次发射再将深空拖船送入地球轨道，然后，两者在地球轨道上完成对接，再由深空拖船提供飞行动力支持，雄鹰飞船的燃料主要用于其飞行轨道校正。雄鹰飞船的辐射防护和升级改造问题已经基本解决，其辐射防护措施大大增强，远程通信和以第二宇宙速度返回大气层时的下降控制以及其他方面也都进行了相应的升级改造。

2019 年 9 月，俄罗斯能源火箭与航天公司公布了雄鹰飞船的技术特点：向月球轨道的起飞重量为 20 吨（而向地球轨道起飞重量为 14.4 吨），返回时可携带重量为 100 千克物品（从地球轨道返回地面可携带 500 千克物品），月球轨道飞行时间为 180 天（地球轨道飞行时间则为 365 天）。

2019 年 12 月，能源火箭与航天公司称，雄鹰载人飞船可以将 420 千克的有效载荷运送至月球轨道上，其中包括 4 名航天员和 100 千克货物，因此，每名航天员体重不能超过 80 千克。

3. 小鹰载人登月飞船

2020 年 12 月，俄罗斯能源火箭与航天公司宣布准备研制轻型版本的雄



2020 世界载人航天发展报告

鹰载人飞船，取名为小鹰载人飞船。该飞船乘员 2 人，比雄鹰飞船轻 5 吨，飞船生命保障系统因此变轻。

小鹰载人登月飞船的研制方案是在罗戈津宣布对叶尼塞运载火箭进行重新修改方案后提出的。俄罗斯的前期载人登月任务使用安加拉系列运载火箭，但由于受安加拉-A5M 和安加拉-A5V 运载火箭推力的限制（这两种运载火箭还不属于超重型运载火箭），需要减轻雄鹰载人飞船的重量。

载人登月计划的新实施方案包括利用俄罗斯的近地轨道空间站对飞月综合体（深空拖船、小鹰载人飞船、月球着陆/起飞舱）组合后飞往月球轨道、两名航天员着陆、返回地球。美国“阿波罗”登月时在月球轨道上留守一名航天员，而俄罗斯的返回舱是在月球轨道上处于无人飞行状态，这是两者的区别。俄罗斯航天员首次登上月球时，将会在月球表面工作几天，之后再乘月球起飞舱飞回到轨道上与返回舱对接，最终乘小鹰载人飞船返回地球。

4. 太空货运拖船

2020 年 10 月，俄罗斯国家采购网站上发布的俄罗斯国家航天集团的材料显示，俄罗斯计划耗资 42 亿卢布用于设计核动力太空拖船，该拖船的首要科学任务包括向月球运送货物。根据核动力拖船的要求文件，该拖船将 10 吨货物舱从距地球表面 900 千米高度的地球轨道上转移到月球轨道上，用时不会超过 4 800 小时（200 天）。

俄罗斯宇航学会的通信院士安德烈·约宁称，货物可以提前发往月球，用拖船比传统的飞船运输要便宜很多，并强烈建议航天员和货物的运输方式要分开，以确保低运输成本；可以提前 200 天发射货运飞船，这样就会与航天员一同抵达月球。

（三）登月服

1. 舱内服

俄罗斯星星公司准备于 2022 年前为雄鹰载人飞船生产出一套可重复使用的隼-M 新型舱内服（紧急救生服）。俄罗斯在 2019 年莫斯科国际航空航天展览会上对外公开展示了隼-M 新一代舱内服，该航天服是“隼”系列航



天服的升级改造版，专门为俄罗斯雄鹰新型载人登月飞船设计的舱内航天服，可重复使用 10 次以上。与隼-KB2 型舱内服相比较，优点明显。

(1) 穿戴速度快。由于隼-M 航天服将使用密实性拉链，因此穿戴速度要比现在的航天服快 2 倍，现在的航天服穿戴速度大约为 5 分钟，隼-M 只需 2 分半钟即可穿戴完毕。

(2) 尺寸大小可调整。隼-M 航天服可以根据航天员的身材大小进行调整，而目前的隼-KB2 型航天服是为每一个航天员量身定做的，这是一个比较大的差别。

(3) 使用寿命长。隼-M 航天服的有些部件将使用世界上最为先进的材料，如聚氨酯材料、密实性拉链等，可多次重复使用。

原计划新一代航天员舱内服将设计为增强型材料制成的单层结构，但测试结果并不理想，不能达到设计者要求。因此，新一代舱内服重新改为双层结构，一层是密封结构，另一层是刚性结构。星星公司从 2019 年 8 月开始了隼-M 航天服装备设计验证试验，当时已经生产出了一套样品，该样品外层壳体使用了聚氨酯材料和刚性材料相结合技术，并采用了柔性活动关节结构。根据俄罗斯星星公司的航天服研制试验计划，隼-M 型舱内服拟于 2020—2021 年完成结构性能鉴定和综合功能性能试验。

2. 舱外服

2019 年 8 月，俄罗斯星星公司向俄罗斯国家航天集团提交启动研制新型月球舱外服的建议。航天员在执行载人登月任务时，将身穿海鹰新型舱外服，为了增加登月服的灵活性和可移动性，其刚性部分会做得短些。此外，月球舱外服下身带有活动关节，以便于航天员在月球表面行走。现在的舱外服没有这种裤子，因为在国际空间站舱外活动作业时只使用双手，只有将航天员固定在特殊“锚”器时才使用双腿。登月舱外服外壳采用复合材料，研制时间大约四年。

(四) 月球车

俄罗斯计划于 2028 年用“月球-29”探测器将首台重达 1.3 吨的月球车



2020 世界载人航天发展报告

运往月球表面。该月球车由机器人操控，在月球表面能够行驶 500 千米并对多个地点的月壤进行钻探勘察，钻探深度可达 6 米。目前，俄罗斯正在研制月球车搭载的科研设备和拟制月球车探测任务，并据此来确定月球车的技术要求。

2019 年 7 月，俄国家航天集团公司和俄科学院均对“地质勘探机器人”大型月球车和“月球侦探”中型月球车的研制计划表示支持。这两个项目都将会列入俄罗斯下一个航天计划内，目前正在设计研制方案。“地质勘探机器人”大型月球车项目预计在下一个十年航天计划内研制完成。

据俄新社 2020 年 5 月最新报道，俄罗斯科学院公布的年度报告中指出，目前“月球-28”探测器正处于设计阶段，月球车的重量设计在 30~150 千克之间，这也意味着月球车上的科研设备重量要控制在 5~25 千克之间。而为了能在月球车上安装俄罗斯最先进设备，俄罗斯首辆月球车重量将有可能达到 150 千克。根据采样目的和科研优先原则，月球车上将会安装一个重量小于 2 千克的紧凑型被动式中子光谱仪，或者重量为 6~7 千克的主动式伽马和中子光谱仪。

（五）月球天文观测站与月球基地

月球基地天文观测站的建设工作属于月球探索计划第三阶段内容。2019 年 5 月，俄罗斯科学空间研究院院长列夫·捷列内依称，月球基地天文观测站预计于 21 世纪 20 年代末期至 30 年代初期开始建设，计划在月球极地地区部署两个观测站，主要用于射电天文研究（能捕捉到更为遥远的、来自其他星系中的无线电辐射信号）和宇宙射线研究（能观测并记录到太空最高能带电粒子特性）。将来，月球天文观测站的数量还会增加。俄罗斯首个月球天文观测站的建设任务将有可能由机器人来完成。

2019 年 10 月，俄罗斯国家航天集团正在研究名为“守护神”的月球基地项目，该基地有一座小型核电站，还包括一个通用对接舱口、几台多功能钻探机、3 个带有居住舱的圆柱体以及末端有一个竖井钻机。月球基地重 70 吨，最深处为 41 米，圆柱体总体积 624 立方米，最多可容纳 50 人。



三、结束语

俄罗斯的载人探月计划从 2014 年开始，由于经济原因始终处于“难产”之中，一直都无法不顾及成本的大规模实施，未来能否按期实现也是一个未知数。俄罗斯的航天实力继承苏联，一直居于世界前列。因此，当俄罗斯发布登月计划后，很多专业人士都非常看好，值得高度关注。

（中国航天员科研训练中心）

国外新型载人运载火箭技术特点及 发展趋势分析

载人航天作为人类太空探索活动的重要领域，是促进航天技术发展的重要驱动因素，而载人运载火箭则是载人航天的重要基础和前提，是航天技术水平和实力的集中体现。截至 2020 年，美国、俄罗斯执行过载人航天任务的火箭包括美国的宇宙神 D、大力神 2、土星 5 和猎鹰 9，俄罗斯的东方、上升和联盟火箭。其中，猎鹰 9 火箭是自航天飞机退役之后，使美国再次拥有载人航天发射能力的载人运载火箭。俄罗斯的联盟系列载人火箭服役时间最长，自 1967 年执行首次载人任务以来，经过多次改进，目前执行载人发射任务的型号为联盟 2-1a。美国的航天飞机作为世界上唯一投入使用的载人型重复使用运载器，对于载人航天技术的发展起到极大推动作用，在 2011 年退役。近年来，美俄等航天大国正在进行运载火箭的升级和更新换代，并以此为基础逐步发展新型载人航天运载火箭，包括美国的航天发射系统（SLS）、超重-星船、猎鹰 9、火神、新格伦，以及俄罗斯的安加拉-ASP、叶尼塞等型号。针对新型载人运载火箭，各国均采用新技术进一步提升火箭的可靠性和安全性，同时也将成本因素考虑在内，计划实现载人火箭的重复使用。

一、国外主要新型载人运载火箭的概况

NASA 正在研制的航天发射系统（SLS）重型运载火箭采用两级氢氧加



固体助推器的构型，大量继承成熟技术和产品，例如，一子级采用航天飞机主发动机改进型号 RS-25，上面级采用 RL-10 氢氧发动机，主箭体结构继承自航天飞机直径 8.4 米的外贮箱，固体助推器则是在航天飞机四段式固体助推器的基础上加长至五段式。为了保证任务进度和后续能力需求，NASA 采用渐进式的研制模式，在现有构型的基础上进一步开发能力更强的探索上面级和先进助推器，逐步将 SLS 的近地轨道运载能力从 70 吨提升至 130 吨，用于实现美国的“阿尔忒弥斯”深空探索计划，计划在 2021 年首飞，2024 年实现载人登月的目标。

美国 SpaceX 公司的猎鹰 9 为直径 3.7 米的两级载人运载火箭，一、二子级共用隼-1D 液氧煤油发动机，一子级采用 9 台海平面型，二子级采用 1 台真空型，近地轨道运载能力 22.8 吨。猎鹰 9 在 2020 年 5 月首次执行载人发射任务，其一子级成功被回收。SpaceX 公司计划在 2021 年首次将复用一子级用于载人发射任务。猎鹰重型火箭是在猎鹰 9 基础上，捆绑 2 枚通用芯级助推器，近地轨道运载能力达到 63.8 吨。该火箭原计划用于发射红龙商业载人飞船到月球轨道，但由于计划变更而取消。不过 SpaceX 已经在 2020 年获得 NASA 的月球“门户”货运补给合同，将利用猎鹰重型发射龙 XL 货运飞船到环月轨道。该公司正在研制的超重-星船完全重复使用重型运载火箭，采用火箭级加飞船级的新型设计方案和全不锈钢材料的箭体结构，直径 9 米，以全流量分级燃烧循环的猛禽液氧甲烷发动机为主动动力，近地轨道运载能力 100 吨，利用在轨加注技术实现月球等深空目的地 100 吨级的运载能力，最终目标是用于火星移民。截至 2020 年底，SpaceX 已经利用星舰 SN8 原型机完成 12.5 千米高度的飞行试验，最早将在 2021 年实现入轨飞行试验。

美国联合发射联盟公司（ULA）的火神火箭大量继承了宇宙神 5 和德尔塔 4 的方案和技术，采用两级低温液体加固体助推器的构型，直径提升至 5.4 米。一子级采用 BE-4 液氧甲烷发动机，半人马座上面级采用 RL-10 氢氧发动机，近地轨道最大运载能力 27.2 吨，计划在 2021 年首飞后通过多次飞行任务验证可靠性，逐步替代宇宙神 5 火箭发射星际客船载人飞船。后续，ULA 还将利用充气式热防护、降落伞和直升机空中捕获实现一子级发动机部段的回收复用。



2020 世界载人航天发展报告

美国蓝源公司正在研制的新格伦大型运载火箭采用两级构型，直径达到 7 米。一子级采用 7 台 BE-4 液氧甲烷发动机，能够利用垂直起降技术实现重复使用，二子级采用 2 台 BE-3U 氢氧发动机，近地轨道运载能力达到 50 吨。蓝源公司正在面向商业和政府的多方需求开展商业空间站论证、载人登月着陆器研发等工作，新格伦火箭后续在载人航天领域将有很大的发展和应用空间。

俄罗斯正在研制的安加拉-A5P 火箭基于新型安加拉-A5 火箭改进而来，采用模块化的设计方案。一子级和 4 个捆绑助推器为 URM-1 模块，采用 RD-191 液氧煤油发动机，二子级为 URM-2 模块。采用 RD-0124A 液氧煤油发动机，近地轨道运载能力 24 吨，计划在 2024 年搭载雄鹰新型载人飞船首飞。另外，俄罗斯还在采用渐进式的研发模式，以 RD-180 和 RD-170 等成熟的液氧煤油发动机为基础，利用在研的联盟 5 和联盟 6 中型火箭的一子级，捆绑形成近地轨道运载能力 100 吨的叶尼塞重型运载火箭，用于实现俄罗斯载人登月的目标。

二、国外新型载人运载火箭的技术特点分析

（一）重复使用技术日渐成熟，载人火箭能够同时兼顾可靠性和成本

以猎鹰 9 和新谢帕德为典型代表的载人运载火箭，已经成功应用了垂直起降重复使用技术，通过执行数十次发射任务证明了技术的可行性和可靠性。尽管这两型火箭的回收复用硬件还未执行过载人任务，但是 NASA 在 2020 年初已经同意 SpaceX 采用回收复用的一子级执行载人发射任务，最早将在 2021 年实现应用。新谢帕德作为亚轨道太空旅游飞行器也将在 2021 年开展载人飞行，并实现商业化运营。从猎鹰 9 火箭复用成本（3 000 万美元^①）和官方报价（6 250 万美元）的差距可以看到，重复使用带来的成本优势非常显著。因此，从技术发展趋势上而言，载人运载火箭可以通过重复使用同

^① SpaceX 火箭装配总监克里斯托弗·库鲁里斯在接受媒体采访时表示，复用一子级和整流罩的情况下，猎鹰 9 火箭的价格可降至 3 000 万美元（<https://www.cnbc.com/2020/04/16/elon-musk-spacex-falcon-9-rocket-over-a-million-dollars-less-to-insure.html>）。



时兼顾可靠性和成本。

（二）液氧甲烷动力综合性能突出，在载人火箭上的应用在逐步增加

因液氧甲烷火箭发动机综合性能突出，包括比冲比煤油高、密度比液氢高、甲烷和液氧的沸点接近等特点，使其成为发展热点。甲烷作为烃基燃料比煤油更加清洁，积碳少，便于重复使用。另外，人类可以在火星等深空目的地实现甲烷的原位制造，而载人任务必须要解决返回过程的推进剂需求问题，因此液氧甲烷动力对于未来的深空载人任务也能够提供很大的帮助。目前，在研的液氧甲烷发动机主要包括美国的 BE-4、猛禽和欧洲的普罗米修斯发动机，前两者应用的火神火箭和超重-星船未来都将执行载人任务。根据阿里安航天公司官员透露的信息，普罗米修斯作为欧洲下一代火箭的主动力，也有执行载人任务的可能性。总体而言，液氧甲烷动力在载人火箭上的应用会逐步增加。

（三）全面采用低温推进剂，在轨贮存和管理技术越来越受重视

国外载人运载火箭已经基本实现无毒化，采用氢氧、液氧煤油、液氧甲烷等低温推进剂。随着载人航天的快速发展，人类探索范围将向更远的深空扩展，如果采用低温推进系统，推进剂的在轨贮存和管理将得到更广泛的关注。一方面，深空任务中，火箭本身（尤其是上面级）需要长时间在轨运行，需要控制低温推进剂蒸发，解决绝热等技术问题；另一方面，大规模的深空探索计划中，必须利用在轨推进剂加注，低温推进剂的转移和贮存都是很大挑战。因此，未来低温推进剂贮存和管理技术将成为载人火箭最为关注的问题之一。

（四）轻质结构材料技术不断进步，载人火箭的运载能力将得到进一步提升

随着铝锂合金材料和碳纤维复合材料在载人运载火箭上的应用越来越多，以及材料制造技术和工艺的不断改进，载人运载火箭的结构性能正在不断增强，运载能力也得到提升，使得发射质量更大的载人飞船成为可能。猎鹰 9 火箭是铝锂合金应用的典型型号，全箭主要结构均采用 2198 铝锂合金



2020 世界载人航天发展报告

材料。复合材料在载人火箭上的应用较为广泛，一般都是连接结构，包括级间段、适配器等，最主要的贮箱结构上还没有应用。另外，搅拌摩擦焊、非热压罐、3D 打印等新制造工艺技术也得到了比较广泛的应用，对于提高结构性能有较大帮助。

（五）测试发射环节趋向智能化、自动化，缩短发射时间降低系统风险

无人自主等智能技术的快速发展推动载人运载火箭的测试发射环节向着智能化和自动化方向发展，高度集成的自动化连接器、射前自主测试、自主安全系统等应用越来越广泛，以缩短发射测试的时间，降低载人系统的风险。SLS 重型运载火箭继承了航天飞机高度集成的气液电连接器，并进一步提升了自动化程度；ULA 公司在火神火箭上延续了宇宙神 5 火箭的“简洁发射台”理念，实现了发射流程的简化和优化；猎鹰 9 火箭采用了自主飞行安全系统，利用箭上系统自主判断飞行状态，执行安全逃逸指令，提高了系统的可靠性，减少了地面操作人员的数量。

（六）发动机多机并联布置方案增多，有助于实现自主飞行重构、提高可靠性

自主飞行重构技术基于多台发动机并联布置方案，在单台发动机故障（甚至多台发动机故障）的情况下，通过推力调节、延长点火时长、弹道重构等方式，仍然能够保证完成发射任务，对于提高载人发射任务的可靠性具有显著的效果。包括猎鹰 9、超重-星船和新格伦等载人火箭都采用多机并联的方案，而且猎鹰 9 的推力冗余技术已经在 2 次发射任务中得到了验证。

三、国外新型载人运载火箭的发展趋势分析

（一）循序渐进，针对载人任务逐步完善、提高可靠性

国外载人运载火箭均采用了循序渐进的发展思路，尽可能地基于成熟技术或利用成熟型号，针对载人任务进行完善，提高可靠性。



SLS 重型火箭大量采用航天飞机的技术基础，包括 RD-25 发动机继承自航天飞机主发动机，五段式固体助推器是在航天飞机助推器的基础上改进而来，芯级主结构直径也沿用航天飞机外贮箱 8.4 米的直径。而 SLS 系列型号的发展也遵循了运载能力从小到大、新技术逐步验证的思路。超重-星船的研制是按照 SpaceX 公司的研制模式，尽可能多地通过接近真实飞行状态的验证机，开展地面和飞行验证，逐步对各项关键技术进行验证。猎鹰 9、安加拉-A5P 则是基于现有的成熟型号，根据载人任务需求得到适应性的改进，满足载人任务对于可靠性的要求。火神、新格伦等在研的新型载人运载火箭，并不是在型号投入使用后立即开展载人任务，而是要经过长时间的飞行，在可靠性得到实际任务的验证后，再逐步转向载人任务。俄罗斯发展的叶尼塞重型运载火箭，则是以联盟 5、联盟 6 等火箭的研制作为基础，待其一子级在飞行任务中得到验证，打下良好的技术基础后，再通过捆绑构型，实现更大运载能力，服务于载人深空任务。不同的型号发展思路会有所区别。但是总体而言，载人运载火箭的发展均不是一蹴而就，而是通过长期的技术积淀和工程研制才能取得成功。

（二）任务需求牵引，运载能力大幅提升

人类在 20 世纪 60 年代实现载人登月后，受技术难度、应用价值、国家经济实力等方面的综合影响，世界载人航天活动逐渐回归到近地空间，而航天飞机在 2011 年退役后，国外仅有联盟一型载人运载火箭，近地运载能力仅为 7 吨。但探索浩瀚宇宙是人类永恒的梦想，随着近几十年来深空探测的开展和世界各国经济持续发展，人类对宇宙的认识日益深入和丰富，对载人探索的需求也日益迫切，不仅美俄等国政府提出了目标更长远的载人深空探测计划，包括 SpaceX、蓝源在内的众多商业公司也提出深空探索计划。于是在任务需求的牵引下，国外新型载人运载火箭的运载能力得到了大幅提升，首先是 SLS、叶尼塞、超重-星船等瞄准月球、火星的载人火箭的近地轨道运载能力超过了百吨，猎鹰 9、火神、新格伦、安加拉-A5P 等大中型载人运载火箭的近地轨道运载能力也都超过了 20 吨。



（三）重复使用成为商业公司发展载人运输系统的重要方向

在政府开展的各类载人航天任务中，可靠性是最重要的因素，对于成本并不是特别敏感，例如美国的 SLS 项目一直面临非常严重的成本超支，然而为了保证任务成功，并不会在研制过程中选择折中方案。但是对于面向商业需求的商业航天公司而言，成本因素会显得更为重要，无论是远期希望实现火星殖民、近期开展载人轨道旅游的 SpaceX 公司，还是要将人类活动范围扩展到太空的蓝源公司。为实现目标，这些商业公司需要进行非常高频率的载人发射任务，如果仍采用传统的一次性运载火箭，很难面向商业市场实现公司的正常运营。所以这两家公司都选择采用重复使用技术来降低载人火箭的成本，同时也能够缩短发射周期，为大规模的商业空间活动奠定基础。

（四）技术验证手段越来越丰富，技术验证过程越来越充分

为了保证可靠性，国外开展新型火箭研制的过程中，所能够采用的技术验证手段越来越丰富，包括仿真、地面试验和飞行试验等方方面面的新方法，验证的内容和过程也更加充分。例如，NASA 利用飞机搭载飞行，对 SLS 重型火箭的制导控制系统进行仿真验证，利用 RS-25 地面试车的机会对 3D 打印制造的 POGO 蓄压器进行验证，利用小规模固体发动机对新固体装药配方进行验证，芯级开展静压加载试验等；SpaceX 公司通过建造大量的地面验证样机对超重-星船的结构、材料、工艺进行充分验证，利用验证机低空飞行试验验证技术方案可行性和猛禽发动机的性能，建设更多的试车台为猛禽发动机提供更好的试车条件；为验证载人龙飞船的逃逸能力，SpaceX 专门利用一枚执行过飞行任务的一子级搭载龙飞船开展飞行中的逃逸试验等。

在国外运载火箭大范围进行更新换代的背景下，动力、结构和控制等专业技术不断取得进步，使得新型载人运载火箭的综合性能得到显著提升，其中主力大中型载人运载火箭的提升最为显著，能够发射规模更大的载人飞船，甚至能够执行部分深空载人任务。同时，伴随着动力系统更加成熟、自主重构技术受到重视、测试水平不断提高、智能自主技术应用更



加广泛，新型载人运载火箭的可靠性也大幅提升。尽管高可靠性通常意味着高成本，但是重复使用技术在国外载人运载火箭上的应用，有望在一定程度上降低载人航天的成本。最后，重型运载火箭作为人类向更远深空开展探测活动的基础，不仅需要技术进步，还需要系统方案的创新，以及持续大规模的经费投入。

（北京航天长征科技信息研究所）

“超重-星船”运输系统及其未来影响简析

“超重-星船”运输系统是 SpaceX 公司正在研制的重点项目，该运输系统未来将替代 SpaceX 现有的猎鹰 9 和猎鹰重型火箭，可用于执行包括卫星发射、轨道空间站补给与维护、全球“点到点”超快速客运服务以及火星殖民等任务。SpaceX 公司预计在 2021 年实现“超重-星船”的首次轨道飞行，最早在 2023 年执行首次载人绕月飞行任务，2024 年执行火星货运任务，2027 年执行火星载人任务。

一、“超重-星船”系统方案和最新研制进展

“超重-星船”系统方案自 2016 年公布以来，经过几次重大的修改，从公布之初的星际运输系统（ITS）方案，到 2017 年的超重猎鹰火箭（BFR）方案，直至目前的“超重-星船”方案，在不断修改中逐渐向可实现的方向发展。“超重-星船”采用船箭一体化设计，包括“超重”火箭级和星船飞船级。运载能力超过 100 吨。能将 100 人送往月球、火星或其他遥远目的地，或是绕地球飞行。系统全长 120 米，起飞质量为 5 000 吨，起飞推力 7 400 吨（约合 72.52 兆牛），两级均可重复使用。

“超重”火箭级：高 70 米，直径 9 米，推进剂加注量为 3 300 吨，设有 4 个栅格舵（外形由矩形改为菱形），并设 4 个固定尾翼兼着陆支腿。将采用猛禽液氧/甲烷发动机，但发动机数量经多次修改，目前仍在论证中。据



SpaceX 创始人艾伦·马斯克透露，火箭级发动机数量可能是 28 台。

星船飞船级：高 50 米，直径 9 米，采用 6 台猛禽液氧/甲烷发动机，推进剂加注量为 1 200 吨，采用双鸭翼+双尾翼，设 6 个可伸缩着陆支腿。鸭翼和尾翼均改成梯形，以提高着陆时的翼面控制效率。迎风面防热由气膜主动冷却改为防热瓦。

研制进展：在“超重-星船”系统的研制过程中，SpaceX 依然遵循其快速分阶段验证的迭代式研制模式，验证设计概念和方案的可行性。从项目的公布到首架星船验证机的建成仅仅用了 3 年。自 2019 年 3 月，项目进入密集测试阶段。截至 2021 年 2 月 20 日，已对 1 架“星跳”号验证机、1 架 MK 全尺寸原型机、7 架 SN 系列原型机和多台 9 米直径不锈钢贮箱进行了测试。虽然试验造成多架原型机的损毁，但实现了“星跳”号验证机和 SN5、SN6 全尺寸原型机的 150 米试飞，SN8 和 SN9 的 10 千米级高空试飞。验证了星船导航系统、全箭不锈钢箭体的结构强度、新型着陆支腿以及其他一些基本功能。有力地证明了 SpaceX 公司采取的迭代式研制模式的有效性。

SpaceX 公司的博卡奇卡生产设施正保持着高速的生产节奏，博卡奇卡试验设施的第二个亚轨道发射台也已投入使用。自 SN9 和 SN10 起，SpaceX 有可能每个月有两架星船原型机同步进行测试。目前，星船 SN10 原型机已完成组装并运至亚轨道发射台，即将开展飞行前测试。星船 SN11 原型机的贮箱部分已完成组装，将与 SN10 在发射台会合。SN12 正在装配厂房中进行组装。此外，SpaceX 将开启新一轮贮箱测试，以验证最新的升级改造。即，所采用的不锈钢材料厚度由原来的 4 毫米减少至 3 毫米，使星船的蒙皮厚度减少了约 25%。

此前超重火箭级原型机的制造工作迟迟未开展，马斯克对此的解释是“受生产能力所限”。而经过一年的建设，随着位于博卡奇卡的装配中心的建成，SpaceX 目前已经具备了相当规模的生产能力。并在 2020 年 10 月，开启了首枚超重火箭级原型机的制造工作。该原型机代号为 BN-1，有可能配备 2~4 台猛禽发动机。目前该原型机仍在装配厂房中进行组装。



二、技术特点分析

（一）采用争议较大的全箭不锈钢结构设计

从 2016 年首次方案公开到 2018 年底，SpaceX 公司一直都宣称该星际运输系统将采用碳纤维复合材料。但在 2018 年末突然宣布，改用近些年并不常见的不锈钢材料，并立即报废了曾经用重金购买的复合材料工装。SpaceX 公司给出的理由是从太空超低温到重返大气层的高温状态，全不锈钢箭体的可用强度与质量比，要比碳纤维、钛合金等航天材料表现更好，只是在常温时不如后两者。不同于半人马座上面级的不锈钢气压设计，“超重-星船”采用轴压设计，贮箱在不加注时仍保持结构完整。同时，贮箱还要反复加注泄放过冷甲烷和液氧，这都是之前业内鲜有应用的设计。最初，星船验证机采用的是高质量 301 级不锈钢。但在 2020 年 6 月，SpaceX 利用 SN7 原型机贮箱进行了低温加压试验，验证了另一种不锈钢材料（据称与 304L 类似），得出结论是这种不锈钢材料在低温下具有更强的延展性和韧性。

（二）采用猛禽液氧/甲烷发动机

“超重-星船”采用的猛禽液氧/甲烷发动机为全流量补燃循环发动机。该发动机设计推力为 1 993 千牛，约为猎鹰 9 火箭使用的隼-1D 发动机的 2.5 倍。发动机比冲 330 秒，主燃烧室压力超过 250 巴（25 兆帕），具备高比冲、深度节流的特点。一旦投入使用，将有望成为第一款投入实用化的液氧/甲烷发动机，也是第一款全流量补燃循环发动机。根据马斯克的说法，单台猛禽发动机设计可执行 1 000 次飞行，几乎无需维护。采用甲烷燃料具有以下优点：首先，燃烧起来比猎鹰 9 火箭使用的煤油更清洁，因此发动机上的焦化更少，有利于重复使用；其次，价格便宜并且可以在火星上提取，能够满足未来探火的需求。



（三）采用新的回收方式

“超重-星船”系统为完全可重复使用运载器，其火箭级与飞船级均可回收。其中，星船飞船级设计采用了与此前截然不同的回收方案。

当从轨道返回时，星船不以垂直姿态进入大气层，而是以 60 度倾斜的姿态及 25 倍音速的超高速“躺着”进入大气层。星船将由四个单独控制的襟翼精确引导下降，两个为鸭翼在鼻锥上，两个尾翼在船尾部分。根据马斯克的说法，“在超声速状态下产生升力，这对限制峰值加热非常重要”。换句话说，星船将尽可能最大限度地利用空气制动。最终在接近地面时还将进行一次大幅机动，点燃猛禽发动机进行翻转，最后垂直到达地面进行精确着陆（见图 1）。星船的回收比猎鹰 9 火箭一子级的回收要困难得多，但如果 SpaceX 公司能做到这一点，将会是革命性的突破。

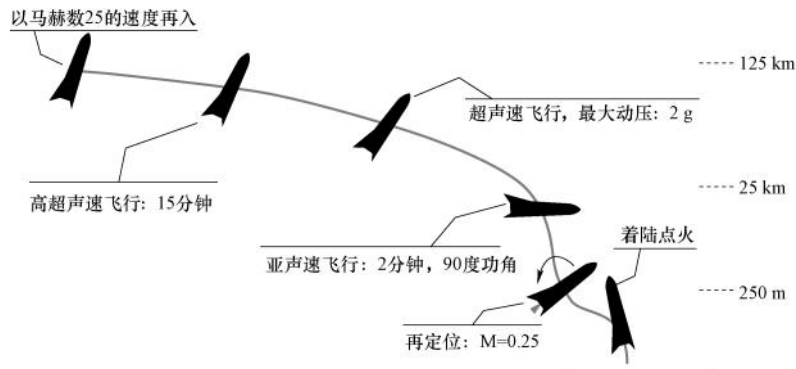


图 1 星船着陆剖面

（四）采用防热瓦设计

由于不锈钢的熔点较高，新的不锈钢“超重-星船”设计与碳复合材料相比，需要的热防护措施较少，从而弥补了钢重量更大这一缺点。飞船从低轨道返回时，表面约 20% 的部分将暴露在最高温度约 1 476 °C 的环境中，另外 20% 最高温度至 1 326 °C，其余表面最高温度将低于 1 176 °C，这是不锈钢无需任何额外冷却即可承受的温度。再入时箭体所承受的温度最高不超过 330 °C，发动机部分周围的温度不超过 925 °C，可采用被动辐射冷却来应对。



2020 世界载人航天发展报告

这意味着星船的背风侧不需要任何隔热层。

而在迎风面，最初马斯克曾设想使用双层不锈钢外壳+液膜冷却来实现隔热。但最终 SpaceX 研发团队还是决定采用坚固、可重复使用的隔热瓦，从而使系统整体更轻。迎风面隔热结构将大部分由六边形隔热瓦组成。选择这种形状是因为“它没有能够让热流加速通过的直线路径间隙”。

SpaceX 并未透露隔热瓦所采用的材料，而根据 SpaceX 与 NASA 的合作协议推测，SpaceX 很可能在星船上采用该中心拥有的新型 TUFROC 隔热材料（增韧型单片纤维增强抗氧化复合材料），该材料用于美国空军试验航天器 X-37B 的翼面前缘，经过飞行验证，且 TUFROC-X 可直接贴敷于不锈钢材料，工艺上相较碳纤维结构有所简化。

三、未来影响分析

目前，星船原型机已实现 10 千米级的高空试飞，最早将于 2021 年完成轨道发射测试。目前看来该时间表过于乐观，但该系统一旦研制成功并投入使用，势必对美国航天发射项目、商业发射市场与太空环境等领域带来重大影响。

（一）有望助力美国实现重返月球计划，也为 SLS 项目带来更大压力

自 2011 年航天飞机退役以来，SpaceX 公司与 NASA 的合作越来越紧密，在 NASA 发射中所占的份额也越来越大。目前，SpaceX 承担了 NASA 超过半数的发射，包括许多科学有效载荷，还通过了 NASA 的载人认证，执行国际空间站乘员轮换任务。此外，SpaceX 还被 NASA 选中为其设计月球着陆器，参与到 NASA 的“阿尔忒弥斯”重返月球计划。如果“超重-星船”系统能顺利按照计划研制成功，那么将具备 100 吨以上的 LEO 运载能力、重复使用能力、载人运输能力，可以通过一次发射将超大型有效载荷送入轨道。这些都符合美国重返月球计划的需求。

相比之下，美国为重返月球而开发的 SLS 重型火箭，自 2010 年开始研制，成本已增加了一倍，到 2020 年投入已超过 180 亿美元，到 2025 年将达



到 410 亿美元。SLS 的研制进度也一推再推，比最初计划的首飞时间至少要延迟 3 年。反观 SpaceX 公司，仅用 5 亿美元就研制出 LEO 运载能力达 53 吨的猎鹰重型火箭，并正在积极推进运载能力 100 吨以上的“超重-星船”。而 SLS 初始型 LEO 运载能力仅为 70 吨，最终版 LEO 运载能力为 130 吨。此外，SLS 设计仅能搭载 4 名航天员，而“超重-星船”宣称可搭载 100 人。美国公众纷纷建议把钱投给 SpaceX，由它来完成“阿尔忒弥斯”计划。因此，一旦“超重-星船”的研制取得了实质性进展，很可能引起公众对 SLS 项目更为强烈的诟病。

（二）拓展国际商业发射市场

作为近年来的商业航天新秀，SpaceX 快速发展壮大，它的每一次进步都给国际商业航天发射格局带来了不小的冲击。SpaceX 成立初期，火箭发射市场主要由美国联合发射联盟（ULA）与欧洲阿里安航天集团垄断，单次轨道发射的价格高达 2.2 亿美元。SpaceX 以低成本、高可靠为发展理念，把握美国航天产业的市场化发展机遇，在 2010 年首次成功发射猎鹰 9 火箭，以阿里安-5 发射报价的 1/3 进入商业火箭市场，一举打破垄断。随后，SpaceX 公司在火箭回收与复用上取得的进展，使得全球商业火箭市场呈现新业态，火箭技术快速迭代，商业发射成本大幅降低。从 2008 年开始，SpaceX 陆续获得 NASA、美国空军、铱星公司等发射订单。发射载荷也从科学实验与验证、NASA 货运，拓展到通信、遥感与导航卫星。2018 年，猎鹰重型成功首飞，成为现役运力最强火箭，进入全球商业发射市场。根据 FAA 统计，SpaceX 在全球商业火箭发射市场的占有率从 2013 年的 13% 上升到 2018 年的 52%。公司估值从 2015 年的 101 亿美元上升到 2020 年的 360 亿美元。SpaceX 的“超重-星船”定位于载人深空探索，预计发射成本低廉，一旦研制成功并投入使用，将有望拓展新的国际商业发射市场领地，引领探索星际旅行市场。

（三）增加太空环境隐患

SpaceX 的急速扩张也可能给太空环境带来不利因素。具有一次性部署



2020 世界载人航天发展报告

400 颗“星链”卫星能力的“超重-星船”系统在投入使用后，势必加快太空这块“草原”的“沙化”，增加太空碎片，加剧太空环境恶化，影响航天器进出太空和在轨运行；并且，由于卫星频率、轨道资源紧张，将促使各国对卫星频轨资源的抢夺日益激烈。

（北京航天长征科技信息研究所）

国外新型载人飞船技术特点及发展趋势分析

随着科技的不断进步和载人航天领域的持续发展，目前世界主要航天国家、优势商业航天企业纷纷开展新型载人飞船的研制或研究论证工作。近地轨道方面，美国商业公司积极发展新型可重复使用载人飞船，主要包括 SpaceX 公司的载人龙飞船和波音公司的星际客船；印度也提出天空飞船计划。载人月球探测方面，美国的猎户座飞船将用于支持“阿尔忒弥斯”计划；俄罗斯也正在加紧研制新一代雄鹰飞船，执行未来的载人月球探测任务。

一、国外新型载人飞船概况

国外主要航天国家为落实本国航天发展计划，积极推进新型载人飞船研制工作，发展了载人龙飞船、星际客船、猎户座飞船、雄鹰飞船、天空飞船等系统，发展基本情况见表 1。

（一）载人龙飞船

载人龙（Crew Dragon）飞船是美国推进近地轨道载人航天商业化的产物，由 NASA 资助，SpaceX 公司研制，是美国的新一代飞船。NASA 只需支付政府航天员运送费用，由 SpaceX 公司完成载人飞船的研制、发射和运行任务。载人龙飞船具有可重复使用、乘员运输能力强、内部空间大、操作友好等特点，能够执行低成本、业务化的近地载人航天飞行任务。载人龙飞



2020 世界载人航天发展报告

船采用两舱段设计方案，包括乘员舱和非密封舱两部分，设计最多可搭载 7 名航天员，乘员运输能力达到航天飞机同等水平；飞船可在轨独立飞行 1 周时间，对接状态下可在轨停靠 210 天；乘员舱回收后经过检修可快速投入重复使用，设计能够使用 5 次，有利于大幅降低运行成本。载人龙飞船已于 2019 年成功开展无人飞行试验，并于 2020 年完成发射逃逸试验、载人飞行试验等，正式通过 NASA 认证，已经投入正式乘员运输服务。

（二）星际客船飞船

星际客船（Starliner）也称为乘员空间运输-100（CST-100），是 NASA 商业乘员计划支持的载人飞船，用于为国际空间站提供乘员运输服务。飞船由波音公司研制和运营，是在继承波音公司此前参与的“阿波罗”、航天飞机、国际空间站、“轨道快车”等项目的技术和经验基础上，引入新理念和新技术形成的新一代载人飞船。星际客船为两舱段设计，包括乘员舱和服务舱两部分；乘员运输能力强，设计最多可搭载 7 名乘员，也可按照乘员加货物的形式进行混合搭载，独立飞行状态设计寿命 60 小时，对接状态设计寿命 210 天；飞船采用气囊缓冲着陆，是美国第一艘在陆上回收的飞船，具备重复使用能力，官方称乘员舱最多可使用 10 次。星际客船于 2019 年开展了无人飞行试验，由于计时器错误，飞船未能与国际空间站对接，仅在轨开展一系列技术验证后返回地球。NASA 在 2020 年完成事件调查，认为在研制流程、测试方法和监管方面存在疏漏。波音公司计划 2021 年重新开展无人飞行试验。

（三）猎户座飞船

猎户座（Orion）飞船也称作“多用途载人飞船”（MPCV），是美国“阿尔忒弥斯”计划的重要组成部分，承担关键的航天员地月往返运输功能。飞船最早属于小布什政府时期的“星座”重返月球计划，随后尽管“星座”计划取消，但猎户座飞船作为关键、通用的运输系统得以保留，持续进行研发。飞船由 NASA 总体负责，洛克希德-马丁公司主承研。猎户座飞船是少数能够用于地月空间乘员运输的载人飞船，具有多种用途，能够支持月球、小行



星、火星及其卫星等多个目的地的探测任务。飞船由乘员舱、服务舱和发射紧急中止系统构成，可搭载 4 名航天员，在轨停留时间长，并能够高速再入大气返回地球，检修后可重复使用。猎户座飞船于 2014 年进行了高速再入飞行测试，计划 2021 年实施无人轨道飞行试验。

（四）雄鹰飞船

雄鹰（Orel）飞船是俄罗斯发展的用于载人月球探测的新一代飞船。飞船最初由俄欧合作开展初步论证，随后俄方决定单独开展研制，飞船多次更名，此前曾命名为“新一代有人驾驶运输飞船”（PTK-NP）、联邦（Federation）等。雄鹰飞船是俄罗斯国家航天集团重点发展的系统，瞄准 2030 年实现俄罗斯首次载人登月，飞船最初设计可兼顾近地轨道任务和载人月球探测任务，最新任务安排将其专用于载人月球任务。飞船最多可搭载 4 人，发射质量为 20 吨，在短期向月飞行时，飞船可重复使用 10 次；在与绕月轨道站对接进行长期飞行时，飞船可重复使用不少于 3 次。俄罗斯计划 2023 年开展雄鹰飞船无人飞行试验。

（五）天空飞船

天空飞船（Gaganyaan）是印度正在发展的载人飞船，也是印度第一型载人飞船。印度政府于 2018 年 8 月正式宣布开展载人航天计划，提出在 2022 年前将本国航天员送入太空。天空飞船由印度空间研究组织（ISRO）负责，国防研究和开发组织（DRDO）、印度斯坦航空有限公司（HAL）等多家机构参与研制。天空飞船是全自主载人飞船，包括乘员舱和服务舱，能够搭载 3 名航天员，独立在轨飞行 7 天，用于近地轨道载人航天任务。

表 1 国外新型载人飞船发展基本情况

系统	所属国家	运管单位	研制单位	用途	进展与后续计划
载人龙飞船	美国	SpaceX 公司； NASA	SpaceX 公司	近地	2019.3.2 无人首飞； 2020.5.30 载人首飞； 2020.11.16 正式服务
星际客船	美国	波音公司； NASA	波音公司	近地	2019.12.20 无人首飞（异常）； 计划 2021 年重新无人试飞



续表

系统	所属国家	运管单位	研制单位	用途	进展与后续计划
猎户座飞船	美国	NASA	洛马公司	月/近地	2010.5.6 发射台逃逸-1; 2014.12.5 探索飞行试验-1; 2019.7.2 上升逃逸-2; 计划 2021 年无人飞行试验
雄鹰飞船	俄罗斯	ROSCOSMOS	ROSCOSMOS	月/近地	计划 2023 年无人首飞
天空飞船	印度	ISRO	ISRO	近地	计划 2022 年首次载人飞行

二、国外新型载人飞船技术特点分析

(一) 液体逃逸发动机技术突破，自逃逸技术成为重要发展方向

传统的载人飞船采用逃逸塔方案，使用固体火箭发动机，新一代载人飞船突破了液体逃逸发动机技术，进一步发展了自逃逸方案。固体逃逸发动机由于其参数不可修改，只能用于单一的逃逸用途；相较而言，液体逃逸发动机能够支持多种任务，除紧急情况逃逸救生外，还能够用于支持运输系统入轨、在轨机动、在轨返回等，提升任务的灵活性。

随着液体逃逸发动机技术的突破，自逃逸技术已经成为重要的发展方向，并获得了实际应用。美国载人龙飞船、星际客船等新型载人飞船采用了自逃逸技术，载人龙飞船在外侧壁布置 8 台“超级天龙”发动机，星际客船在服务舱布置 4 台发射中止发动机，支持紧急情况发射逃逸。这种技术方案能够提供全过程逃逸能力，同时由于避免了逃逸塔的级间分离等程序，飞行过程简单，有利于提高可靠性。经过特殊设计，自逃逸系统使用的燃料可与飞船姿轨控系统使用的燃料共用，推进系统也可用于多种工况，意味着燃料和系统效率增加。例如，在任务正常的情况下，原先发射逃逸的燃料可用于在轨机动，使飞船具备更大的 ΔV ，未来可完成更多类型任务。此外，与逃逸塔需要抛掉不同，载人龙飞船将自逃逸发动机布置在乘员舱上，逃逸系统能够随飞船一起回收。



（二）重复使用成为标志性特征，重复使用能力持续深化发展

重复使用是新一代载人飞船的一个标志性特征，国外新型载人飞船大多具备重复使用能力。载人龙飞船的舱体结构、发动机、电子设备、传感器、对接机构等均可重复使用；星际客船、猎户座飞船等的结构、电子设备、生保系统、座椅等也可重复使用。

重复使用是一项综合性技术，涉及飞行方案、系统总体设计、结构、材料、推进等多个学科。从总体设计角度，新型载人飞船将高价值设备（例如传感器、电子设备、发动机等）尽可能多地布置在乘员舱，实现关键设备回收，降低飞船运行成本。例如，载人龙飞船将核心的逃逸发动机、姿轨控发动机、电子设备、传感器全部布置在乘员舱以完成回收。新型载人飞船为确保回收设备的完好性，采用了大量额外的密封性设计，例如，载人龙飞船头锥采用可开合式保护罩，保护相关设备在再入过程中不受烧蚀，海面溅落后不被海水侵蚀；猎户座飞船也对布置在舱外的设备采用密封处理，避免海水侵蚀。

当前，载人飞船重复使用没有达到稳定状态，提出的重复使用次数多为初步设计值，实际使用次数可能大幅减少。例如，载人龙飞船、猎户座飞船最初均提出重复使用 10 次，但随着研制工作的推进，其指标均有所下降，SpaceX 公司提出载人龙飞船或将使用 5 次；NASA 提出猎户座飞船在轻度复用情况下可使用 5 次，重度复用情况下可使用 2 次。各型飞船需根据每次任务的具体情况确定复用哪些设备，并依据各次任务情况逐步提升复用程度、次数、频率，其重复使用仍是一个需要持续试验、改进、深化的过程。

（三）对接机构更新换代，支持低碰撞、多用途等能力需求

载人龙飞船、星际客船、猎户座飞船、雄鹰飞船等系统的对接机构均采用“国际对接系统标准”（IDSS）。IDSS 标准由美国国家航空航天局、俄罗斯航天局、欧洲航天局、日本宇宙航空研究开发机构、加拿大航天局共同制定。国外通过采用统一标准实现航天器互相对接，为未来载人航天器互访、互助提供便利。



2020 世界载人航天发展报告

IDSS 标准继承了 APAS-95 对接机构的形制，并引入了低碰撞等大量新技术。例如，载人龙飞船和星际客船采用了 NASA 对接系统，其根据 IDSS 标准研制，显著的特点是能够“软捕获”，引入了低碰撞电磁技术、低碰撞机械软捕获技术等，对航天器对接过程更加友好。此外，IDSS 标准的对接机构除了支持对接外，还能支持停泊期间空气、电力、数据、指令、通信、水、燃料、氧化剂、增压剂等互通和共享，显著提升航天器任务能力，在未来任务中具有扩展性。对于大型空间站的建设和运行，新型载人飞船的低碰撞对接方式能够减缓对太阳翼、相机等设备的冲击，改善上述设备的在轨运行环境。

（四）热防护结构和材料持续改进，支持飞船重复使用和高速再入

新型载人飞船强调重复使用能力，热防护系统是载人飞船重复使用的核心问题之一，对飞船适用性、可靠性、可维护性及成本具有重要的影响。从轨道返回地面的载人飞船具有巨大的动能和势能，在飞行过程中 90% 的时间内飞行速度大于 5 千米/秒，且处于极其恶劣的飞行环境。飞船总加热量极高，弹道式惯性体驻点温度可达 8 000~10 000 °C，采用高升阻比外形的载人飞船表面温度也可达到 1 700 °C 以上。

载人龙飞船采用了第三代酚醛浸渍碳热烧蚀材料（PICA-X）作为隔热大底，并采用“SpaceX 专有烧蚀材料”（SPAM）作为外侧壁，再入时可承受超过 2 000 °C 高温。星际客船使用轻质烧蚀材料（BLA）作为隔热大底，采用先进柔性可重复使用表面隔热材料（AFRSI）作为外侧壁隔热层，可耐受超过 1 650 °C 的再入高温。猎户座飞船使用 AVCOAT 作为隔热底罩的主要材料，使用氧化铝增强隔热瓦（AETB-8）作为外侧壁主要材料，AVCOAT 是将环氧酚醛树脂添加到玻璃纤维蜂窝结构中制成的，具有重量轻、耐烧蚀的特点。国外通过持续改进热防护结构和材料，满足飞船系统重复使用、载人月球探测任务高速再入返回等需求。

（五）群伞减速方案广泛应用，满足更大质量返回舱的回收需求

在新型载人飞船回收领域，国外普遍采用群伞回收方案，回收重量为 5~



10 吨。例如，载人龙飞船安装 2 具减速伞和 4 具主伞，将飞船减速至 7.6 米/秒；星际客船安装 2 具减速伞和 3 具主伞；猎户座飞船采用 2 具减速伞和 3 具主伞，将飞船减速至 10 米/秒；雄鹰飞船安装 3 具主伞。此外，天空飞船虽然与联盟飞船等上一代载人飞船较为类似，但也安装 2 具主伞，在 1 具主伞工作即可保证安全回收的情况下采用了 2 具伞同时工作、热备份的方案，能够将飞船减速至 11 米/秒。

与单伞系统相比，群伞系统的优势表现在：1) 群伞系统中，单具伞面积小，加工制造与维护难度小；2) 采用热备份方式工作，在一具伞失效的情况下仍能保证安全回收，可靠性更高；3) 不需要单独设置备份伞系统，简化了开伞控制程序；4) 由于不需要为备份系统留有安全开伞高度，所以开伞高度较低，降落伞的气动减速效率高，开伞过载小。

(六) 海面溅落、陆上缓冲技术并行发展，支持多样化的着陆需要

国外新型载人飞船采用了不同的着陆方案，载人龙飞船、猎户座飞船、天空飞船采用海面溅落方案，星际客船、雄鹰飞船采用陆上着陆方案。

海面溅落方案简单，不需要额外的缓冲系统，对着陆角度的约束较少；但海上环境较为复杂，同时为了重复使用需要对飞船进行一些专门的设计。陆上着陆方案对重复使用较为友好，且陆上回收保障条件相对较好；但另一方面，陆上回收需要专门的缓冲系统，例如气囊、反推、着陆架等，增加系统额外重量，同时为了保证着陆过程的稳定性，需要限制着陆角不能太大。气囊缓冲技术具有缓冲气囊质量较轻、折叠性能良好、成本低廉等优势，已经发展成为一种有效的缓冲技术，是一个值得关注的发展方向。星际客船使用了着陆气囊，可以有效避免最终速度带来的硬冲击，缓冲效率高，着陆状态稳定。

(七) 信息化水平升级、舱内布局优化，提升飞船操控性、舒适性

国外新型载人飞船较上一代飞船普遍优化了舱内布局，采用了简洁化座舱设计技术，通过精简传统仪器仪表，优化控制面板，将大屏幕作为统一的人机界面。载人龙飞船在舱内设置了 3 块大屏幕，互为备份，飞船驾驶



员和副驾驶员利用大屏幕触屏进行控制；飞船将传统的实体控制开关变为虚拟开关，只保留少数必要的实体开关用于确保大过载情况时功能的可靠性。这种设计能够省去大量开关所需的线路，减轻飞船重量（例如，航天飞机上有约 2 000 个开关、各种仪表，开关和仪表后面需要连接大量线路，整体质量较大）。随着飞船信息化水平大幅提高，控制面板能够通过更新软件实现快速升级，同时，高度电子集成和平板显示降低了飞船操作难度，对于航天员更加友好。

新型载人飞船的另一个特点是逐步从注重功能性向关注舒适性转变。上一代载人飞船舱内空间相对狭小，飞行过程中航天员舒适性较差。例如，联盟飞船采用三舱构型，返回舱内部容积 4 立方米，轨道舱内部容积 6.5 立方米，空间分隔后视觉上更加局促；载人龙飞船、星际客船内部容积均在 10 立方米左右，与联盟飞船相当，但飞船采用两舱构型，加压容积集中在返回舱，整体感觉空间更大，航天员舒适度大幅增加。新型载人飞船简洁的舱内布局减轻了航天员的视觉压力，例如星际客船借鉴了波音公司商用客机积累的经验，内部采用柔和色彩和环绕型天蓝色 LED 灯，可以为乘员带来舒适的感受。

三、国外新型载人飞船发展趋势分析

（一）系统建设方面，国外新型载人飞船即将进入集中服役时期

载人飞船是人类进入太空的重要工具，在载人航天活动中发挥了关键作用。自航天飞机退役后，在长达 9 年的时间内，国外仅有俄罗斯联盟一型飞船处于服役状态，期间俄、美等国均依靠该飞船实现地球与国际空间站的往返。SpaceX 公司的载人龙飞船率先投入商业乘员运输，打破了这一局面；波音公司正在大力推动星际客船的研制工作，并取得重要进展；围绕载人月球探测活动，美国正在发展猎户座飞船，俄罗斯也加紧研制新一代的雄鹰飞船。根据各系统研制规划，预计未来 2~3 年内，新一代载人飞船将进入集中服役的时期，形成载人航天发展新局面。随着美、俄等航天大国积极推动新型载

人飞船研制工作，未来将有更多载人飞船飞入太空，助推近地轨道载人航天能力升级，并支持载人航天走向更远的空间。国外载人飞船参数对比如图 1 所示。

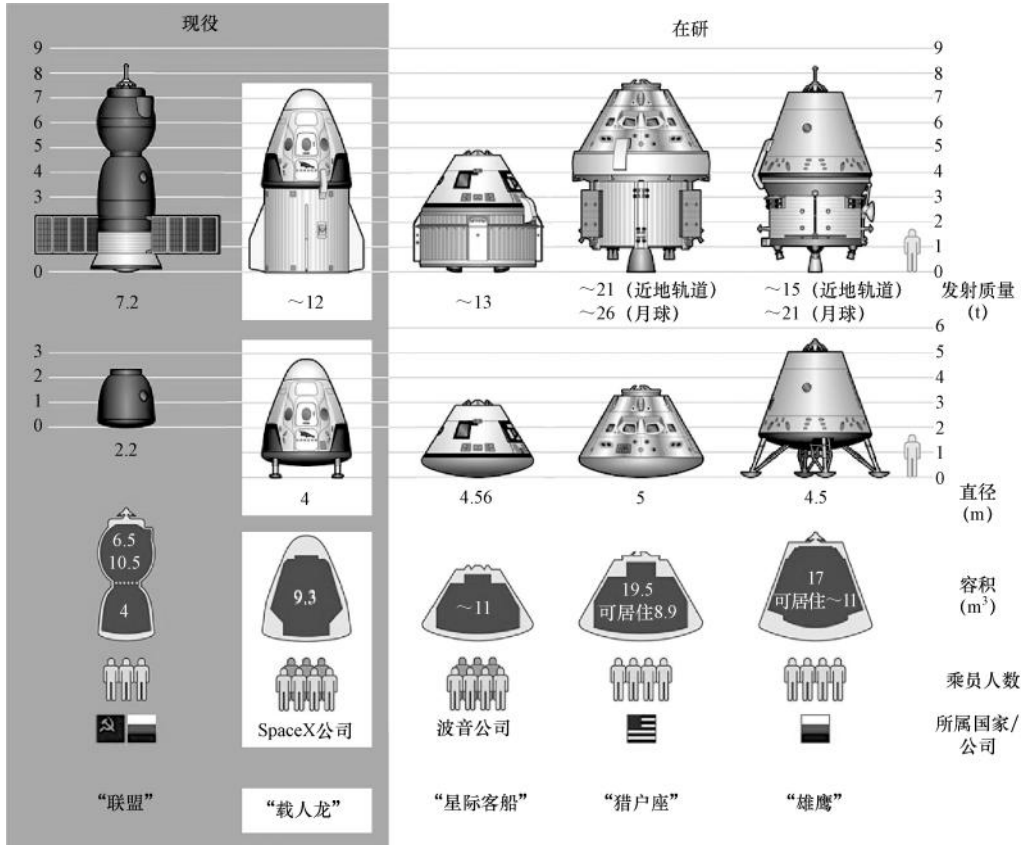


图 1 国外载人飞船参数对比

(二) 系统性能方面，国外新型载人飞船整体性能将大幅跃升

随着世界航天的发展，各国面临全新的载人航天任务需求：一方面是维持近地轨道载人航天活动的连续性，另一方面使人类活动范围逐步拓展到更远的空间。新需求促使新型载人飞船整体能力大幅跃升。在任务适应性方面，新型载人飞船除了能够支持近地轨道任务，还能够用于月球探索任务，任务持续时间有所增长。在规模方面，执行近地轨道任务的新型载人飞船发射质量在 10 吨以上，执行月球任务的新型载人飞船发射质量超过 20 吨；在乘员人数方面，近地轨道任务可搭载 6~7 名航天员，乘员运输能力达



2020 世界载人航天发展报告

到航天飞机同等水平，月球探索任务则可搭载 4 名航天员；此外飞船搭载载荷能力也有所增加，且通过调整航天员数量能够搭载更多的载荷。此外，新型载人飞船还具备重复使用能力，进而降低任务成本、提升载人航天可持续性。国外载人飞船总体能力对比如图 2 所示。

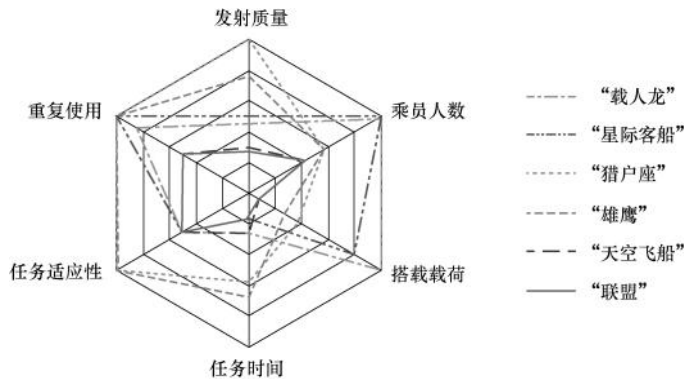


图 2 国外载人飞船总体能力对比

（三）发展模式方面，商业化成为载人航天系统发展的重要途径

在传统的国家主导研制和运行模式基础上，国外在发展新型载人飞船过程中引入了商业化模式。当前，商业航天已经成为美国载人航天活动中的一个重要力量。SpaceX 公司的载人龙飞船和波音公司的星际客船均是在 NASA 商业乘员计划的支持下发展的。传统上，NASA 负责项目整体管理和运行，研制工作向承研商层层分包；在商业乘员计划中，入选的商业公司负责项目的整套运营，包括总体设计、研制、试验、发射和运营管理等，NASA 仅采购乘员运输服务，并负责进度、安全监管及技术支持，提升商业公司在项目研制和运作上的自主性、灵活性。通过上述手段，NASA 从传统的购买产品或服务，转为与工业界合作，帮助其开发近地轨道运输服务，支持商业公司成为载人航天领域新的力量。鉴于商业货物补给和商业乘员运输计划的成功，美国后续将持续推进商业载人航天发展，并将此模式拓展应用到“阿尔忒弥斯”计划中。



四、总结

国外围绕载人航天长期发展需求，正在积极推动新型载人飞船的研制工作。新型载人飞船整体能力有显著提升，发射质量、最大乘员人数大幅增加，任务适应性更加强大。在技术特征方面，新型载人飞船在传统逃逸塔方案上，引入了自逃逸方案；重点发展了可重复使用能力，回收高价值设备进而降低任务成本；在对接机构、热防护结构和材料、群伞减速、着陆缓冲、信息化等方面做了大量技术创新，全面提升系统性能。未来 2~3 年，国外新型载人飞船将相继投入运行，能提供更加强大的服务能力，满足近地轨道持续有人活动和载人月球探测等发展需求。同时，商业航天力量也积极开展新型载人飞船的研制运行活动，形成多方参与的格局，推动世界载人航天迎来全新发展局面。

（北京空间科技信息研究所）

载人龙飞船典型飞行任务解析

2020 年，美国 SpaceX 公司研制的载人龙飞船取得了多项重要进展。1 月 19 日，载人龙飞船成功进行发射逃逸试验，在最大动压情况下安全逃逸，溅落在海面并完成回收；5 月 30 日，载人龙飞船成功开展首次载人飞行试验，将 2 名航天员送入太空，并于 8 月 1 日搭载 2 名航天员安全返回，这是航天飞机退役后，美国时隔 9 年再次将航天员送入轨道；11 月 16 日，载人龙飞船将 4 名航天员送入轨道，在国际空间站开展为期 6 个月的任务，这是载人龙飞船的首次正式商业乘员运输服务，标志美国正式恢复载人航天运输能力。

一、项目背景

随着航天技术的发展，近地轨道载人航天技术日趋成熟，美国政府将载人航天的下一步目标定位于更具挑战的载人月球/深空探索；同时，在 2011 年航天飞机退役后，美国只能依靠俄罗斯联盟飞船执行载人航天飞行任务。在此背景下，NASA 积极推动将近地轨道载人航天活动移交给商业公司。目前，美国商业货运补给已发展成熟，正式投入服务超过 8 年，商业乘员运输正在发展之中。NASA 支持了 SpaceX 公司载人龙飞船和波音公司星际客船（Starliner）的研发工作，两型载人飞船均在 2019 年开展了无人飞行试验，载人龙飞船在 2020 年成功开展了发射逃逸试验、载人飞行试验，率先完成



全部认证工作，正式投入业务化商业乘员运输服务。

二、首次载人飞行试验任务概况

北京时间 2020 年 5 月 31 日，美国 SpaceX 公司在佛罗里达州肯尼迪航天中心 39A 发射台利用猎鹰 9 运载火箭成功将载人龙飞船发射入轨，开展载人飞行试验任务。载人龙飞船在飞行约 19 小时后与国际空间站成功对接，航天员顺利进入空间站。经过 2 个月的飞行，飞船搭载 2 名航天员安全返回地球，溅落在佛罗里达州以西的墨西哥湾上。此次任务是载人龙飞船的首次载人航天飞行，也是航天飞机退役后时隔近 9 年美国再次自主将本国航天员送入轨道。

载人龙飞船的载人飞行试验任务代号为“演示-2”（Demo-2），是航天飞机退役后美国首次从本土利用本国航天器将航天员送至国际空间站，也是该飞船的最终试验任务。此次任务对载人龙飞船发射、交会、自主对接、停泊、再入、溅落、回收的整个飞行程序进行全流程测试和认证。航天员将执行此次任务的飞船命名为“奋进”号（Endeavor）。

此次任务中，载人龙飞船搭载了 2 名航天员，分别是 NASA 的道格拉斯·赫利和罗伯特·贝肯。NASA 的另 2 名航天员迈克尔·霍普金斯和维克多·格洛弗担任备份航天员。此次任务的核心是考核飞船，但航天员同时参与站上工作，以减轻空间站运营工作负担。赫利和贝肯为此次任务做了强化训练，对从发射到对接、分离、再入与溅落等过程开展了一系列模拟；同时鉴于任务从原定的驻留约 2 周进一步延长，2 名航天员还做了空间站操作方面的训练，贝肯针对出舱需要进行了太空行走训练。

（一）发射入轨

5 月 31 日，载人飞行试验任务顺利发射，发射过程按照 NASA 和 SpaceX 公司确定的操作程序进行，猎鹰 9 运载火箭在零发射窗口点火，顺利将载人龙飞船送入预定轨道，并成功实现运载火箭第一级的海上垂直回收。表 1 分别是猎鹰 9 火箭发射载人龙飞船任务剖面 and 时序。



2020 世界载人航天发展报告

表 1 猎鹰 9 火箭发射载人龙飞船任务剖面 and 时序

时间	事件
T0-04:15:00	发射前气象报告
T0-04:05:00	乘员交接
T0-04:00:00	乘员穿航天服、检出
T0-03:22:00	乘员出尼尔·阿姆斯特朗运行和检出大楼
T0-03:15:00	乘员前往 LC-39A 发射台
T0-02:55:00	乘员抵达发射台
T0-02:35:00	乘员登船
T0-02:20:00	乘员通信检查
T0-02:15:00	座椅旋转检查
T0-02:14:00	航天服气密性检查
T0-01:55:00	关闭飞船舱门
T0-00:45:00	指挥员发出允许燃料加注指令
T0-00:42:00	乘员登舱通道收回
T0-00:37:00	飞船发射逃逸系统激活
T0-00:35:00	火箭开始加注煤油
	火箭一级开始加注液氧
T0-00:16:00	火箭二级开始加注液氧
T0-00:07:00	开始猎鹰 9 火箭发动机冷却
T0-00:05:00	载人龙飞船转内部电源供电
T0-00:01:00	飞行计算机启动发射前最终检查
	燃料罐开始加压
T0-00:00:45	指挥员发出允许发射指令
T0-00:00:03	发动机点火
T0	发射
T0+00:00:58	火箭达到最大动压
T0+00:02:33	一级主发动机关机 (MECO)
T0+00:02:36	一、二级分离



续表

时间	事件
T0+00:02:44	二级发动机点火
T0+00:07:15	一级火箭回收第一次点火（进入）
T0+00:08:47	二级火箭关机（SECO-1）
T0+00:08:52	一级火箭回收第二次点火（着陆）
T0+00:09:22	一级火箭海上着陆回收
T0+00:12:00	火箭分离，飞船入轨
T0+00:12:46	飞船开始打开头锥

发射任务采用了“加注后即发射”（load-and-go）模式，航天员在发射前约 2.5 小时进入飞船，随后激活飞船发射逃逸系统，以保证航天员安全，之后再推进剂加注。根据 NASA 数据，超冷液氧密度增加 8%~13%，超冷煤油密度增加约 4%，发射前快速加注超冷燃料和氧化剂，可装载更多燃料，提升猎鹰 9 火箭运载能力。

（二）交会对接

载人龙飞船入轨后，乘员和地面控制中心对飞船环控生保系统、推进系统、热控等进行测试，随后飞船进行一系列调相机动，追赶国际空间站。

载人龙飞船从径向接近空间站，随后转移至速度方向，经过约 19 小时的飞行，于美国东部时间 5 月 31 日 10:16 成功与国际空间站“和谐”号节点舱前端的“国际对接适配器”（IDA）软对接，10:27 完成对接机构锁定。本次任务中，载人龙飞船自主完成接近和对接，同时，船上和空间站上航天员持续监控接近和对接过程；但是，在必要时航天员也能够接管飞船进行人工控制，手动进行交会对接。完成对接后，载人龙飞船和国际空间站进行压力平衡，随后打开舱门，2 名航天员进入空间站，成为第 63 长期考察组成员。航天员在站上对载人龙飞船进行一系列测试，并与站上其他航天员开展科学实验等其他任务。在对接期间，控制人员每周启动飞船关键系统，测试太阳能电池和其他系统的性能。



(三) 返回回收

北京时间 2020 年 8 月 2 日 7:35, NASA 的 2 名航天员搭乘“奋进”号载人龙飞船与国际空间站分离。当对接机构解锁后, 飞船发动机实施 2 次离站点火。离站时, 载人龙飞船质量约为 12.5 吨。

随后, 载人龙飞船自主飞行, 实施 4 次飞离点火, 逐渐远离国际空间站。数小时后, 进行 1 次长达 6 分钟的调相点火, 降低飞船轨道, 并将星下点轨迹与着陆区对准。在离轨减速点火之前, 飞船抛掉非密封舱以减轻质量。乘员舱进行约 12 分钟的离轨点火, 再入地球大气层。抛掉非密封舱并完成离轨点火后, 载人龙飞船质量约 9.6 吨。

飞船再入时速度约为 7.8 千米/秒, 再入阶段依靠大气阻力减速, 经历最高温度超过 1 900 °C, 黑障阶段持续约 6 分钟。减至安全速度后, 飞船在 5 500 米高度(速度约 156 米/秒)附近打开 2 具引导伞, 在 1 800 米高度(速度约 53 米/秒)附近打开 4 具主伞进行进一步减速。北京时间 2020 年 8 月 3 日 2:48, 飞船以约 7.6 米/秒的速度溅落在佛罗里达州以西的墨西哥湾上, 主着陆场位于彭萨科拉市(Pensacola)外海, 着陆后飞船切断主伞。载人龙飞船溅落后, SpaceX 公司提前部署在着陆场的回收船释放 2 艘快艇开展先期工作。第一艘快艇负责检查飞船的完整性, 并探测飞船附近是否存在自燃性燃料蒸汽, 检测完成后, 快艇上的人员为飞船回收做准备工作。第二艘快艇负责回收落在水中的降落伞。回收船抵达后, 将载人龙飞船抬升至甲板上固定, 随后打开舱门, 医务人员完成 2 名航天员的初步检查后, 航天员出舱。

航天员出舱后, 先在回收船医疗区进行初步评估, 随后搭乘直升机回到地面。到地面后, 航天员立即从机场搭乘 NASA 的飞机回到休斯顿的埃灵顿(Ellington)。与此同时, 载人龙飞船随回收船返回佛罗里达州的 SpaceX 厂区, 进行进一步检查和处理。

三、系统设计方案

载人龙飞船是由美国政府资助、SpaceX 公司研制的新一代载人飞船。



NASA 只需支付政府航天员运送费用，由 SpaceX 公司完成载人飞船的研制、发射和运行任务。载人龙飞船具有可重复使用、乘员运输能力强、内部空间大、操作友好等特点，能够执行低成本、业务化的近地轨道载人航天飞行任务。

(一) 总体设计

载人龙飞船采用两舱段设计方案，包括乘员舱和非密封舱两部分；设计最多可搭乘 7 名航天员，执行 NASA 任务标准状态搭乘 4 名航天员；独立飞行时可工作 1 周，对接状态下可工作 210 天。飞船直径 4 米，高度 8.1 米，加压容积 9.3 立方米，非加压容积 37 立方米，发射质量超过 12 000 千克，上行载荷能力 6 000 千克，下行载荷能力 3 000 千克，可处理废弃物 800 千克。

非密封舱为开放式筒状结构，内部可携带非加压货物，4 个尾翼在紧急分离情况下可提供气动稳定性；同时在外表面的一半安装了新设计的太阳能电池阵（外壁黑色部分），另一半安装了热辐射器（外壁白色部分）辅助飞船热控制。载人龙飞船还具有高安全性的特点。NASA 对于商业飞船的安全性要求较高，原定乘员损失率（LOC）要求高达 1/1 000，随着系统的研制放宽至 1/270，仍高于联盟飞船、航天飞机等系统。图 1 是各载人航天系统乘员损失率情况。

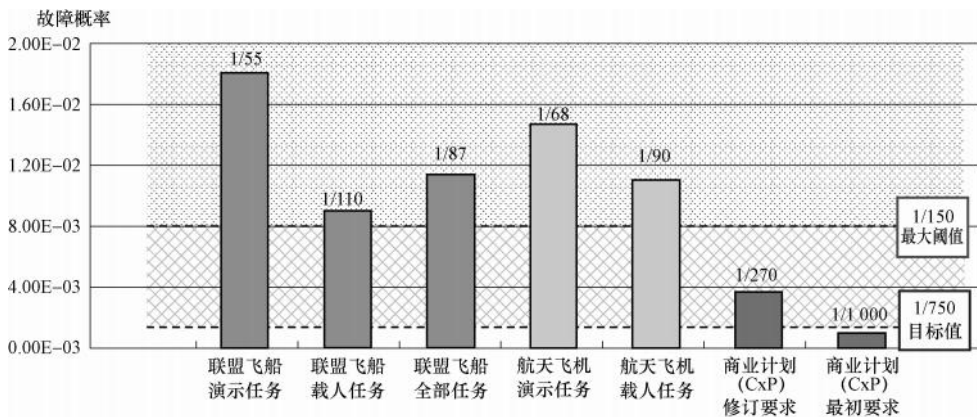


图 1 各载人航天系统乘员损失率



(二) 分系统设计

1. 推进系统

载人龙飞船总共配置了 8 台“超级天龙”(SuperDraco) 发动机和 16 台“天龙”(Draco) 发动机。

“天龙”发动机主要用于在轨近地点/远地点机动、轨道调整、姿态控制等，单台发动机真空推力 400 牛。16 台“天龙”发动机中，4 台安装在飞船前部、分布在对接机构周边，发射时由头锥保护，另 12 台分为 4 组安装飞船外侧。

“超级天龙”发动机主要用于发射逃逸（原计划也可用于软着陆）。8 台“超级天龙”发动机分 4 组安装在飞船外侧的保护舱内，能够防止单台发动机失效引起故障扩散；“超级天龙”发动机采用甲基肼和四氧化二氮推进，二者接触自燃，加注量高达 2.2 吨（1.36 吨四氧化二氮，0.85 吨甲基肼），单台发动机可提供 71.2 千牛推力，具备深度调节能力，可支持飞船执行高精度机动（例如悬停飞行）。“超级天龙”发动机燃烧室采用 3D 打印技术制造，由高性能镍铬基高温合金（因科镍）采用金属粉末激光直接烧结工艺制成；采用碳纤维包裹钛金属的球形燃料罐，用于存储加压氦气、甲基肼和四氧化二氮。

2. 发射逃逸系统

载人龙飞船采用集成式发射逃逸方案（即自逃逸方案），不需要配备逃逸塔，利用 8 台“超级天龙”发动机产生高达 534 千牛的轴向推力，将乘员舱和非密封舱推到安全地带。发射逃逸系统能够快速响应指令，点火指令发出后 100 毫秒内，“超级天龙”可达到全推力，8 台发动机能够在不到 8 秒内将飞船带至运载火箭 800 米以外的范围。

集成式发射逃逸方案相较传统的逃逸塔方案具有多项优势：能够在发射的全过程提供乘员逃逸能力；由于避免了级间分离过程，可提高乘员安全性；逃逸系统可重复使用；逃逸发动机能够在陆地着陆场定点软着陆的情况下提供推力（此方案在研发后期取消）。



3. 交会对接

载人龙飞船采用自主+手动交会对接模式，正常情况下飞船自主交会对接，紧急情况下航天员可手动进行操控。飞船利用红外成像仪、激光测距传感器、相对 GPS 导航系统等提供导航信息，接近国际空间站；飞船前部配备了符合“国际对接系统标准”（IDSS）的 NASA 对接系统（NDS），对接系统在发射和再入时被飞船头锥保护。

4. 防护系统

载人龙飞船采用了升级的第三代 PICA-X 隔热大底和 SpaceX 研制的 SPAM 外侧壁，再入时可承受 2 000 °C 高温。

此外，飞船具备失压防护能力，出现等效 6.35 毫米孔隙的情况下，飞船可安全再入返回。

5. 减速着陆系统

载人龙飞船采用降落伞减速-水面溅落的方式实现精确回收。飞船安装了 2 具引导伞和 4 具主减速伞，引导伞用于再入后稳定飞船，主伞用于进一步降低飞船着陆速度。载人龙飞船采用的“3 型”减速伞较龙飞船进行了全新设计，能够满足各种情况下（尤其是发射逃逸）打开降落伞的需求。SpaceX 公司对“3 型”减速伞进行了 27 次试验，验证降落伞系统的可靠性。

6. 电源系统

载人龙飞船在非密封舱外表面一侧贴太阳能电池，任何角度的阳光照射均可发电。由于飞船不配备太阳帆板，运行过程中避免了帆板展开、对准等过程，可提升系统可靠性，简洁、一体化的设计可支持飞船直接安装在运载火箭上发射，不需要使用整流罩。

7. 飞船其他系统

在座舱内部采用简洁化设计，在人机界面上精简传统仪器仪表。舱内设置 4 块大屏幕，分为 2 组、互为备份，飞船驾驶员和副驾驶利用大屏幕触屏进行控制。为提高大过载情况的可靠性，增加关键功能的实体按键作为



补充。

舱内座椅使用轻量结构固定在舱壁上，每个座椅能适应身高不超过 195 厘米、体重不超过 113 千克的航天员；座椅在发射和再入过程中，能够调整角度，减小航天员身体负荷。

8. 航天服

SpaceX 公司针对载人龙飞船任务研制了航天服，且航天服针对每位航天员量身定制。在发射和再入过程中，航天员需穿着航天服，以防止舱内出现减压等紧急情况。

SpaceX 航天服由一整片材料制成，更加轻便。外层材料可防火焰烧蚀；内置通信和冷却系统，能够提供通信和进行温度调节；使用 3D 打印的头盔，发射和再入过程中还具备听力保护功能；同时，配备了可支持触屏的手套。航天服通过单连接点与座椅连接，防滑鞋可使航天员将脚固定在踏板上。

四、项目经费和规划

（一）项目经费

NASA 通过发展商业乘员运输计划向国际空间站往返运送航天员，从而摆脱对俄罗斯的依赖。在商业乘员计划框架下，SpaceX 公司获得了 NASA 四个阶段的合同，用于开展飞船的设计、研制、试验、生产、运行等各项工作。表 2 是载人龙飞船项目经费汇总情况。

表 2 载人龙飞船项目经费汇总

时间	合同名称	主要内容	金额（美元）
2010.10	商业乘员开发第二阶段（CCDev 2）	飞船的深度研发	7 500 万
2012.08	商业乘员综合能力（CCiCap）	提出完整的端到端操作方案（包括航天器、运载火箭、运载服务、地面和任务操作、回收等）	4.6 亿
2012.12	产品认证合同（CPC）	制定包含工程标准、测试和分析的认证计划	960 万



续表

时间	合同名称	主要内容	金额（美元）
2014.09	商业乘员运输能力（CCtCap），也称产品认证合同第二阶段（CPC 2）	包括设计、开发、测试与评估/认证（DDTE/CERT），认证后任务（PCM），专项研究服务等三大部分服务	26.08 亿（含开发和试验 12 亿）
合计			31.53 亿

NASA 授予 SpaceX 公司的合同总金额约 31.53 亿美元。根据合同 SpaceX 公司需要利用载人龙飞船开展 2 次试验飞行和 6 次乘员运输服务，正式任务中，每次飞船将向国际空间站运送 4 名 NASA 航天员，同时可以运送 1 名太空游客。

如果从总价格折算，均摊研发费用后平均每次任务价格 3.94 亿美元（包括猎鹰 9 运载火箭每次约 6 000 万美元的发射费用），单座价格约 9 850 万美元。

如果分开计算飞船的研制和生产费用，载人龙飞船的总研制费用约 17.45 亿美元，后续正式任务每次费用约 2.35 亿美元（包括猎鹰 9 火箭约 6 000 万美元的发射费用），单座价格约 5 800 万美元。

美国从 2006 年开始购买俄罗斯联盟飞船的座位，2011 年航天飞机退役后只能依靠联盟飞船开展乘员运输，维持在国际空间站上的存在。截至 2019 年底，NASA 累计购买了 70 个座位。2011 年起，联盟单座位价格持续增长，NASA 为防止商业乘员计划再度出现延迟，加购了 2020 年 10 月联盟飞船的一个座位，该合同价格已达到 9 000 万美元。从载人龙飞船价格看，均摊研发费用后的单座价格与联盟大致相当，不均摊研发费用情况下，单座位 5 800 万美元的价格低于联盟飞船。

（二）任务规划

根据 NASA 与 SpaceX 公司的合同，SpaceX 公司先后完成了载人龙飞船发射台逃逸试验、无人飞行试验、发射逃逸试验等多项里程碑，载人飞行试验是最后一项主要的试验任务。载人飞行试验完成后，NASA 和 SpaceX 公司检查所有数据，完成载人龙飞船的认证工作。随后，NASA 正式进入商业



2020 世界载人航天发展报告

乘员运输阶段，授予 SpaceX 公司 6 次乘员运输任务，每次任务将最多搭乘 4 名航天员，同时向国际空间站运送 100 千克货物。载人龙飞船试验及飞行任务安排见表 3。

表 3 载人龙飞船试验及飞行任务安排

任务	代号	飞船	发射时间	简介	状态
发射台逃逸试验	PAT	DragonFly	2015.05.06	发射台逃逸试验	成功
无人飞行试验	Demo-1	C201	2019.03.02	首次轨道飞行试验，成功与国际空间站对接并返回	成功
发射逃逸试验 (飞行过程逃逸试验)	IFA	C205	2020.01.19	2019 年 11 月 13 日利用改进设计的新飞船成功完成静态点火试验。2020 年 1 月 19 日成功开展发射逃逸试验	成功
载人飞行试验	Demo-2	C206	2020.05.30	载人飞行试验，与国际空间站对接，执行 2 人 64 天飞行任务	成功
商业乘员运输服务-1	Crew-1	C204	2020.11.16	载人龙飞船开展业务化乘员运输服务。NASA 授予 SpaceX 公司 6 次乘员运输任务	成功
商业乘员运输服务-2	Crew-2	待定	2020 年后		计划
商业乘员运输服务-3	Crew-3	待定	2020 年后		计划
商业乘员运输服务-4	Crew-4	待定	2020 年后		计划
商业乘员运输服务-5	Crew-5	待定	2020 年后		计划
商业乘员运输服务-6	Crew-6	待定	2020 年后		计划

五、总结

(一) 载人龙飞船成功试飞对美国恢复载人航天能力意义重大

载人龙飞船成功开启载人飞行试验意义重大，此次任务是时隔 9 年美国再次自主将航天员送入轨道，标志着美国重新具备了载人航天飞行能力。美



国各界高度重视此次任务，认为此次任务具有“高度优先级”，将“开启新的载人航天时代”；美国总统特朗普和副总统彭斯更是在三天内两度前往肯尼迪航天中心观摩发射活动，见证历史性一刻。载人龙飞船试验任务成功发射，验证了美国商业乘员计划发展模式，商业航天成为美国载人航天活动中的一个重要力量，美国后续将持续推进商业载人航天系统发展，提升近地轨道载人航天活动能力。

（二）载人龙飞船采用全新设计思路，技术能力有显著提升

载人飞船系统经过近 60 年发展，设计思路几经变革，针对新的任务场景，SpaceX 公司的载人龙飞船明确往返运输功能定位，创新设计思路。采用两舱段设计，加压空间集中在一个舱段内，内部空间更大，航天员舒适度大幅提升。飞船最多能搭乘 7 名航天员，乘员运输能力达到航天飞机同等水平。飞船还采用了集成式发射逃逸系统、简洁化座舱设计，安全性、操作性大幅改善。飞船的制造也引入了 3D 打印、新材料等技术提质增效。整体看，载人龙飞船等新一代载人飞船相较上一代联盟飞船技术能力有显著提升，发射质量、最大乘员人数大幅增加，任务适应性更加强大。

（三）重复使用、低成本是载人龙飞船的重要特点

载人龙飞船整个大系统均具备可重复使用能力，猎鹰 9 运载火箭第一级、载人龙飞船乘员舱均可回收，仅猎鹰 9 火箭第二级和飞船非密封舱无法回收，通过重复使用开展多次任务有望大幅降低成本。此外，载人龙飞船设计了集成式发射逃逸系统，发射时飞船直接安装在运载火箭上，不需要使用逃逸塔和整流罩，可节约大量成本（据 SpaceX 估算，猎鹰 9 火箭的两片整流罩需要约 600 万美元）。目前，SpaceX 公司载人龙飞船平均每座价格约 5 800 万美元，显著低于俄罗斯联盟飞船 2020 年每座 9 000 万美元的报价。载人龙飞船的载人试飞将为美国以经济可负担的方式自主送航天员进入太空奠定良好基础。

（北京空间科技信息研究所）

国际空间站人体研究的最新成果

国际空间站是在微重力环境下进行科学研究的重要实验平台，是研究长期航天飞行对人类有何影响的重要场所，也是唯一支持人类在太空环境下对工作与生活技术进行测试的场所，其研究成果对未来登月和火星任务具有重要意义。太空探索对人体健康风险的研究是国际空间站科学研究的重要组成部分，许多研究探讨了风险产生的机制与微重力和辐射环境的关系，以及太空生活中的其他方面，包括营养、睡眠和人际关系等，还有部分研究旨在开发和验证降低这些风险的对抗措施。这些研究的结果对于实现月球表面探测和驻留任务、以及未来的火星探测任务至关重要。

一、心血管

（一）血管超声探究航天飞行前后的血管变化

已证明与长期航天飞行有关的许多因素可导致心血管系统功能和结构发生变化，这些因素包括体液重新分布、身体运动减少以及环境的压力特性。为了更好地了解变化的程度及其潜在的持久性，欧洲航天局（ESA）开展了血管超声研究。

这项研究试图确定 6 个月的微重力暴露对颈动脉（主要流向头部的血液）、股动脉直径（主要供应下肢的血液）和壁厚的影响。航天员经过训练，



在国际空间站上使用超声技术来提供血管图像，并将其与飞行前和飞行后的图像进行比较。该实验揭示了长期暴露于失重状态下，人体不同部位血管扩张和血液聚集程度。例如颈静脉，这一将头部血液带回心脏的血管，飞行中的测量数据比飞行前的增大 3~4 倍。盆腔和腹部静脉的容积进一步增加，但小腿静脉容积下降，同时下肢出现更大比例的肌肉萎缩和骨丢失。同样，在飞行过程中股浅动脉内膜中层厚度有所增加，但飞行后 4 天恢复到飞行前水平。有趣的是在“火星-500”太空模拟和 520 天限制活动期间（1G 重力，无液体重新分布，无辐射，食物摄入和运动不受限制），颈动脉和股骨 IMT 也增加了。总体而言，鉴于这两种环境下，除了同样出现了高水平的应激外，其他方面都存在差异，研究人员认为应激可能是影响股动脉内壁厚度的主要因素。这些迹象表明航天过程中发生了某种程度的重塑，这可能会影响航天员的整体健康状况。

（二）太空飞行时出现血压的慢性升高

加拿大航天局（CSA）的“国际空间站返回后航天员心血管和脑血管的调节”（CCISS）以及长期航天心血管健康结果的早期证据，突显了航天员动脉血压和大脑血流调节的个体差异，以及与动脉硬化和整体心血管功能有关的因素。

最近的研究观察了血压和心率的自发波动，以量化动脉压力反射反应的有效性。研究表明，与短期飞行相比，在国际空间站上进行长期飞行时，心率对动脉血压变化的反应得到很好的维持。但是，返回地球后，压力反射的反应明显减弱，航天员之间的个体差异很大，可能其中一些人出现头晕和晕厥的风险更大。该研究还发现，在太空进行日常活动期间的心率反应与飞行前相似，但重要的是航天员在太空中的体育活动整体上明显减少，这可能会影响心血管健康，且影响可能持续较长时间。

调节机制对于向脑连续供应含氧血必不可少。研究结果表明航天员返回地球后，脑血管的动态自动调节和 CO₂ 反应受损，与在地球上保持正常的直立姿势相比，在太空飞行时出现血压慢性升高，日常体育活动的减少及长期太空飞行期间不断暴露于 CO₂ 含量略微升高的环境中，可能会影响脑血管对



动脉血压和 CO₂ 变化的反应。

血管研究的最新结果证实，参加国际空间站 6 个月飞行的男性和女性航天员在返回后颈动脉硬化指标增加。硬度增加的程度与正常老化 10~20 年的变化类似。动脉结构和功能变化的机制，可能与每天没有以直立姿势暴露于重力下引发头部和颈部血压较地面升高以及体育活动减少有关。在航天飞行过程中，男性和女性航天员胰岛素抵抗的发展，类似于长时间久坐对健康的影响。这些发现导致了新的研究，以评估胰岛素抵抗的程度，并探索适当的对策以维持心脏代谢健康，这对太空探索和更好地解决地球上的心血管疾病都有帮助。

（三）心肺系统的营养调节研究

俄罗斯的“失重状态下心肺系统的营养调节研究”使用一种新型的、无创的、易操作的示波装置测量血压，目的是评估长期航天飞行前后的血管健康状况。

研究结果表明，两个重要的血管老化生物指标——脉搏波速度和主动脉压，在航天飞行期间或之后没有增加。研究人员得出结论，在轨驻留 6 个月不会导致血管健康的显著临床变化。这些结果表明，航天员在航天飞行期间、着陆后或返回几天后，没有出现过心血管疾病的症状或体征。然而，辐射引起的心血管疾病可能在辐射暴露多年以后才发生。研究人员建议科学界开发先进的技术，以区分血管适应疾病和临床血管疾病。

（四）用心率变异性评估长期航天飞行的抗衰老作用

日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）的“48 小时生物节律”项目研究了地磁空间气象对人类心脏活动的潜在影响，以解释与长寿相关的人体生理变化。

研究人员用国际空间站飞行乘组在飞行前、飞行中和飞行后的心电图数据，评估了心率变异性（HRV）；从挪威特罗姆索大学的极光观测站远程获得了地磁数据。在磁力宁静和磁力干扰的日子里比较了国际空间站航天员的心率变异性。结果表明，磁层的变化可以影响并提高与抗衰老生物标志相关



的 HRV 指标。特别是在磁干扰日，SDNNIDX（所有 5 分钟时段的正常心动周期的标准差的平均值）和 HRV 低频分量都较高。研究人员还发现，在磁干扰的日子里，与大脑默认网络相关的心率变异性波段增加。这些发现表明，航天飞行具有抗衰老的作用，是地球磁场影响人类寿命相关的 HRV 指数的结果。

（五）开发新的航天飞行血压监测方法

航天飞行后，航天员经历了立位耐力不良——从太空返回地面，直立时会感觉头晕恶心。这种情况可能是由于血压迅速下降所致。加拿大航天局研究了一种在飞行中测试长期航天飞行后返回地面时晕厥风险的简单方法，当飞行后无法测量手指动脉压时，使用脉冲到达时间（PAT）替代血压测量。

在航天飞行前和返回 1 天后，国际空间站航天员在完成一项需要他们从躺下到坐起再到站立的体力活动时测量了血压。结果表明，PAT 与体位变化时的收缩压变化有关，所以 PAT 可以作为血压发生明显变化的敏感指标。这种无创、简易的方法有望改善未来太空探险者的血压监测方法。

二、大脑及感知认知

（一）长期航天飞行引起的脑部连通性变化

欧洲航天局首次对国际空间站航天员飞行前后的大脑活动进行了研究。脑扩散张量成像研究的目的是通过使用足底刺激磁共振成像方法刺激太空探险者的脚底，研究运动感知处理的机制。

初步研究结果显示，变化主要集中在大脑体感皮层、额盖和小脑的预期区域。进一步分析表明，在大脑体感网络之外的其他区域（包括与前庭神经系统功能、视觉空间处理和肌肉运动感知相关的区域）的连通性发生了变化。虽然观察到大脑右额上回和其他区域之间的连通性有所增强，但涉及体位感知、内脏感觉和平衡的区域（即小脑前叶、前庭核、右下顶叶皮层和双侧岛叶）之间的连通性减弱。重要的是，大脑的右额上回和脑岛区域的连通性与



2020 世界载人航天发展报告

空间运动病的严重程度存在显著的相关性。观察到的功能连通性的改变可能与空间适应和对地球引力的再适应有关。该项研究为运动感知适应的研究提出了新的假设。

（二）脑部扫描揭示导致视力障碍的原因

在体液头向再分布实验中，NASA 观察了 34 名长期飞行和短期飞行（部分是参加航天飞机计划）航天员的神经解剖学变化。除在太空返回后进行眼睛健康评估外，还使用三台磁共振成像仪在太空飞行之前和之后进行了脑部扫描。这些扫描显示经过长期飞行后，出现脑向上移位、脑室扩大、中央沟和脑脊液空间变窄。而且，每位长期任务后出现视盘水肿的航天员都出现中央沟变窄。

这项研究结果主张将先进的方法整合到 NASA 的成像协议中。尖端技术与纵向设计相结合，可以揭示神经解剖学变化与视觉障碍之间的关系。确定太空飞行后导致视力障碍的原因，将有助于制定对策，以便更好地为下一代探索者做好深空行星际飞行准备。

（三）重力环境对脑电动力学的影响

欧洲航天局开展的“重力环境对脑电动力学的影响”是一项对空间认知、新颖性加工和感觉运动整合的研究，它研究了微重力对视觉神经和认知过程的影响。航天员观察计算机屏幕上显示的虚拟环境，该环境模拟以下两种情况：一种是驾驶飞船靠近国际空间站（即视觉注意力投入的一段时间），另一种是驾驶飞船离开国际空间站（即一段视觉运动参与期）。结果表明，在整个视频互动过程中，与运动相关区域中的脑电活动增加了。这表明在被动视觉注意任务中，通常与运动控制有关的区域也有反应，这很可能是由于微重力下人体姿势的不断重新调整所致。

该研究结果突显了行为任务（即视觉注意）与预期涉及脑区间（即主要运动）的差异。这些发现有助于神经认知的科学发展，纠正自由漂浮的航天员即使不需要运动也能完成手边任务时的体位稳定姿势错误信息。这些结果有助于了解微重力下的大脑功能，对长期太空飞行航天员的神经健康至关



重要。

（四）长期航天飞行中体位感知的视觉依赖性降低

了解太空生活如何影响人的感知对于安全、长期的太空旅行至关重要。在地面上，人会从视觉、重力和身体定位的线索中感知“向上”和“向下”，但是研究表明长期失重确实会改变人的知觉。加拿大航天局的“太空环境中的身体”（BISE）研究了微重力对人体多个感官系统的影响。航天员经常报告飞行中出现视觉重新定位错觉、倒位错觉和运动病，科学家怀疑长期暴露于微重力环境下，可能导致人类方向感知发生重大变化。BISE 研究结果表明，在国际空间站工作 6 个月中，视觉对航天员的影响一直保持下降，并在返回地球后仍持续几个月。返回地球后还出现这种视觉依赖性降低是行星际飞行的一个问题，在这种飞行中，降落在其他行星上的航天员必须在没有地面支持的情况下工作。为了应对这种影响，BISE 研究人员建议将“视觉重力”引入航天器，因为在这里对人体定向的可视化提示通常不明显。

（五）航天飞行后绩效下降与航天因素有关

航天员飞行时，身体已经适应了微重力。当他们返回地面时，需要时间重新适应地球重力。这种重力的恢复会产生许多不良影响。NASA 的手动控制研究分析了航天飞行对需要操作和安全着陆的航天员绩效的影响。

研究结果显示，在空间站飞行 6 个月后返回地面的当天，航天员在手动灵活性、多任务处理、运动感知和驾驶车辆方面的能力显著下降。地面对照组则没有表现出这些情况。因此，飞行后绩效下降与航天因素有关，而与缺乏实践或睡眠不足等其他因素无关。

三、NASA 的双胞胎实验

NASA 具有里程碑意义的双胞胎研究项目，将航天员斯科特·凯利与地面上的同卵双胞胎兄弟马克·凯利的大量样本和测量结果进行比较，观察到斯科特染色体端粒延长（每条 DNA 末端的特征通常会随着年龄的增长而缩



2020 世界载人航天发展报告

短)，从分子水平上证明了人体具有适应航天飞行环境的弹性和稳健性。该项研究是未来生物空间研究的基石，将重点研究分子量级的变化以及如何预测太空探险者的健康和工作能力。

双胞胎研究的结果指出了航天飞行特殊的影响，包括体重减少、染色体改变（端粒动态变化、基因表达和基因组不稳定性）、颈动脉扩张和动脉壁增厚、眼结构改变（视觉改变）、代谢影响、DNA 活性变化（DNA 甲基化）、肠道细菌（胃肠道微生物）的改变和对认知加工的影响。一些变化在返回地面后 6 个月内恢复到基线水平。返回地面 6 个月后观察到的持续变化包括：基因表达发生变化的子集（占 8.7%）、染色体反转导致的 DNA 损伤增加、短端粒数量增加、认知功能减弱。

四、其他研究成果

（一）长期微重力与椎间盘水含量之间没有系统性的关系

NASA 长期航天飞行椎间盘受损风险（椎间盘损伤）的研究，旨在确定长期微重力期间和返回后椎间盘的变化。航天员报告长期微重力飞行中出现背部疼痛，这种情况可能增加返回地球后的背部损伤，例如椎间盘突出。人体脊柱的椎间盘在椎骨间起到垫子的作用，它们形状和体积的改变，可以影响脊柱和背部大小的变化。

参加椎间盘损伤实验的乘组人员已完成太空飞行前后的 6 次实验，以便医生确定椎间盘出现怎样的变化，以及这些变化是否与航天员的背痛有关。结果显示椎间盘水含量没有变化，不是椎间盘肿胀，而是稳定脊柱的多裂肌出现明显萎缩。这种萎缩与腰椎变直和僵硬增加有关。由于这些变化与飞行前脊柱的病理学有关，因此，结合飞行前脊椎病理的证据，它们可能会增加返回重力载荷对航天员造成伤害的风险。这些结果有助于制定针对多裂肌健康的新型对策，并有助于研究肌肉稳定性在慢性腰背痛和椎间盘损伤中的作用。



（二）长期航天飞行中人体核心体温逐渐升高

欧洲航天局的“长期太空飞行过程中人体体温调节的研究”观察了国际空间站航天员在发射前、飞行中、返回后休息和运动期间的人体核心体温（CBT）。结果表明，与地面测量值比较，长时间飞行中 CBT 逐渐升高，体育锻炼时升高更快。此外，研究人员还发现，一旦国际空间站航天员返回地球，体温升高所带来的损害会慢慢恢复正常。对白细胞介素 1 受体拮抗剂（一种抗炎蛋白）的分析表明，该蛋白的较高浓度与体温升高呈正相关。研究人员认为，蛋白质升高可能与微重力、飞行中的剧烈运动、辐射、压力诱发的体温过高或多种因素的促炎反应有关。这些发现表明在理解与太空飞行有关的炎症方面仍存在重大挑战。

（三）航天飞行会影响人类毛囊基因表达

日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）赞助的长期太空飞行对人体头发的生物学分析，研究长期太空飞行对基因表达和微量元素代谢的影响。这是第一次评估航天员在太空多个时间点基因表达变化的研究。活跃的发根细胞分裂表明人体身体健康，而发干则可以记录人生活环境的代谢状况。

从国际空间站 10 名航天员收集到的头发样本，显示成纤维细胞生长因子 18 和血管生成素样蛋白基因表达增加，这些基因通常与头发生长周期中的暂时抑制有关。有趣的是，女性在太空中成纤维细胞生长因子 18 的表达比男性更稳定，这表明在这种情况下女性航天员似乎对航天环境影响具有更好的反应。一些航天员还显示原钙黏蛋白 8 的表达增加，这可能是一种应激反应。而在地球上，原钙黏蛋白 8 的丢失通过破坏细胞间的联系来促进上皮性人类癌症的发生。尽管目前尚不清楚太空飞行是否确实对头发的生长有直接影响，但整体而言这项研究结果确实表明太空飞行会影响人类毛囊基因表达。

（四）长期航天飞行中航天员需要更多心理支持

加拿大航天局开展了多项研究，以检验长期太空探索导致的社会心理问



2020 世界载人航天发展报告

题。一项研究对曾乘坐“和平”号空间站、国际空间站或参加过这两者飞行的资深退役航天员进行了调查，通过私人半结构化面谈、媒体访谈、回忆录、日记和汇报以获得他们在太空飞行时的信息。研究人员使用定性和定量方法进行课题内容分析，量化这些退休航天员对成就、隶属关系和动力的理解，以了解这些价值观如何影响他们的职业生涯。

航天员报告说，实现并取得成功是最重要的，其次是需要与志趣相投的同伴进行社交活动，最后是对权利的需求。尽管权利是推动其职业发展最不重要的成分，但乘组人员认为他们在航天飞行期间缺乏自主权，希望对他们的所作所为拥有更多的控制权，希望对自己所做的工作、工作方式和什么时候做这项工作能拥有更多的控制权。尽管乘组人员在太空探索中起着核心作用，但他们的想法和建议似乎并未得到足够的重视。

研究人员建议为现役和退役乘员提供机会，突出他们对世界的贡献，与同伴保持联系，并在航天员的选拔、训练、时间表安排和其他与航天局相关的活动中征求他们的意见。

五、几点启示

（一）从单一因素研究向复合因素研究扩展

当前，NASA 正在加快研究步伐，力图解决人类航天飞行的 5 大风险：空间辐射、隔离与受限、远离地球、重力场（或缺乏重力场）以及恶劣/封闭环境对太空中人类构成的身体和精神上的巨大威胁。例如，空间辐射、微重力和隔离已经被证明会对中枢神经系统、大脑产生影响。令人担心的是，当同时经受这些压力时，大脑中受各种危险影响的区域可能会更加复杂。这可能导致思维方式、移动身体的方式，以及任务期间对事件和乘组人员情绪反应的改变，这些都可能导致任务的失败。对此，NASA 正在寻求一种完全整合的方法，以此更深入地探索辐射、隔离和限制以及重力场改变之间的关系，以及它们对航天员的中枢神经系统、行为健康和运动感知系统（统称 CBS）所造成的潜在危害。



（二）不断延长飞行时间并持续积累研究成果

2015年，第一个国际空间站一年期任务乘组顺利驻站。一年期任务乘组的研究工作包括大量的科学应用研究和实验，涉及航天生物技术、生物医学研究、地球远程探测等领域。他们共开展了72项实验，其中54项是延续之前乘组已开始进行的实验，12项为新实验。长期考察组获得的数据被用来确定是否有方法进一步降低未来长期任务的风险。这些研究将帮助NASA和国际社会更好地了解航天飞行对人的影响，而且对于准备深空探索，包括载人火星任务至关重要。未来，国际空间站还将延长部分航天员的飞行时间，以及增设更多一年期任务乘组，以此获得更多长期航天飞行的样本数据。

（三）不断拓展航天医学研究的队伍与路径

NASA人体研究计划通过利用地面研究设施、国际空间站以及模拟环境来减少对航天员健康和绩效的风险，从而实现载人空间探索。自2016年10月起，NASA开始执行人体研究计划监督下的转化研究所合作协议，该协议将执行到2022年9月，有可能延长到2028年。自此，NASA航天机构直接主抓并集中了转化研究所、休斯敦贝勒医学院、加州理工学院和麻省理工学院等一批优秀研究团队，集众家所长开展尖端研究，以使研究直接面向任务所需，降低与探索任务有关的健康风险。转化研究所实施了“工作台到太空飞行”的运行模式，允许将实验室或临床试验的研究方法快速转化，将有前途的新方法、治疗手段、对抗措施和技术尽快应用到航天实践中，最终提高航天员的健康和绩效。

（中国航天员科研训练中心）

国际空间站空间生命科学发展 态势和重点成果分析

国际空间站（ISS）自 1998 年发射首个组件以来，一直是世界上最重要的空间生命科学研究平台。大部分空间环境下开展的空间生物学和航天医学研究都是在国际空间站平台上进行的，代表着空间生物学和航天医学研究的发展方向。2020 年国际空间站实现连续载人 20 周年，这是人类近地轨道实验室的重要里程碑。考虑到 NASA 和 ESA 均支持将国际空间站运行至 2030 年，可以预期，在未来相当长的一段时期，国际空间站仍将继续支撑和引领空间生命科学原位实验研究领域的发展。

一、研究方法及数据来源

国际空间站空间生命科学实验数据采集自 NASA 为国际空间站计划建设的专题网站，数据采集时间为 2020 年 12 月 23 日。国际空间站空间生命科学论文产出源自上述专题网站提供的相关信息，这里仅对其中被科睿唯安公司 Web of Science 数据库（WOS）收录的研究论文和会议论文进行分析。由于俄罗斯产出的大部分论文未被 WOS 数据库收录，因此未对相关成果进行分析，俄罗斯在空间生命科学领域的整体表现可能被低估。基于“国际空间站研究和发展大会”遴选出的最受瞩目研究成果和最佳创新研究工作，并结合国际空间站空间生命科学领域高被引论文，分析解读空间生命科学领域近期重点亮点成果。



二、空间生命科学领域实验开展情况

按照 NASA 的分类体系，国际空间站上进行的空间生命科学研究可分为两大方向：生物学与生物技术研究 and 人体研究。2001—2020 年，国际空间站第 0 次至第 63 次长期考察任务共开展 868 项（2 906 次）空间生命科学实验，占国际空间站全部实验总数（2 265 项）的 38.3%，其中包括 589 项（1 385 次）生物学与生物技术实验，279 项（1 521 次）人体研究实验。国际空间站主要机构参与的空间生命科学研究实验统计和变化情况列于表 1、表 2 和图 1 中。

在生物学与生物技术领域，NASA 开展的实验最多，实验项数占总实验项数的比例超过一半。细胞生物学、植物生物学、大分子晶体生长、微生物学是 NASA 开展实验研究数量最多的领域。俄罗斯国家航天集团（ROSCOSMOS）开展的生物学与生物技术实验项数位居第二，研究聚焦在细胞生物学和大分子晶体生长方向（表 1）。

表 1 国际空间站第 0 次至第 63 次远征任务生物学与生物技术领域实验项数

研究方向	NASA	ROSCOSMOS	ESA	JAXA	CSA	总计
动物生物学—无脊椎动物	21	6	4	8	1	40
动物生物学—脊椎动物	25	8	2	12	—	47
细胞生物学	77	25	23	11	—	136
大分子晶体生长	54	55	1	7	—	117
微生物学	53	50	14	10	—	127
微胶囊化	3	—	—	—	—	3
植物生物学	63	22	10	13	2	110
疫苗开发	8	1	—	—	—	9
总计	304	167	54	61	3	589

在人体研究领域，NASA 开展的实验项数同样领先于其他机构，但其领先幅度有所下降。综合生理学和营养学、骨骼和肌肉生理学、心血管和呼吸系统是 NASA 参与最多的人体研究方向。综合生理学和营养学、心血管和呼吸系统方向同样也是 ROSCOSMOS 的研究重点，辐射对人类的影响也是其



2020 世界载人航天发展报告

关注的研究方向。ESA 的研究重点则聚焦在神经和前庭系统等方向（表 2）。

表 2 国际空间站第 0 次至第 63 次远征任务人体研究领域实验项数

研究方向	NASA	ROSCOSMOS	ESA	JAXA	CSA	总计
骨骼和肌肉生理学	18	1	7	3	2	31
心血管和呼吸系统	15	16	12	5	4	52
生保系统	7	3	2	1	—	13
多学科	1	—	—	—	—	1
宜居性和人类因素	6	—	—	—	—	6
人类行为和绩效	13	7	5	2	2	29
人类微生物组	1	1	1			3
免疫系统	10	2	3	3	1	19
综合生理学和营养学	25	19	3	2	—	49
神经和前庭系统	8	7	18	2	6	41
辐射对人类的影响	4	12	4	2	1	23
视力	5	6	—	—	1	12
总计	113	74	55	20	17	279

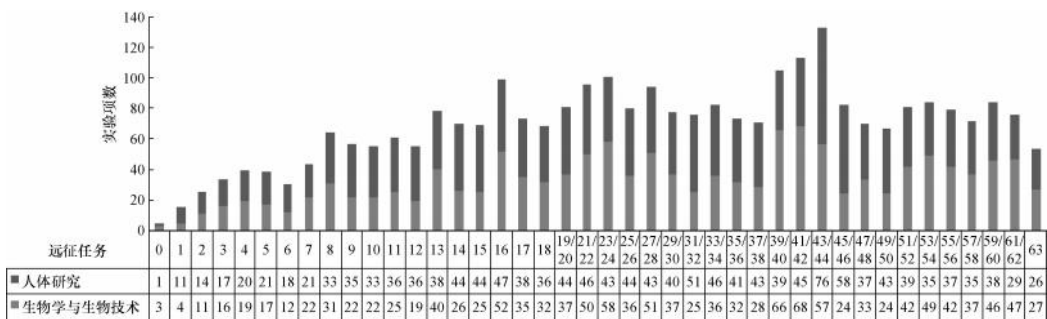


图 1 国际空间站第 0 次至第 63 次远征任务实验次数统计

注：大部分实验会在远征任务中持续进行，因此图中统计的实验次数超过实验项数

三、从空间生命科学领域论文产出看空间生命科学发展态势

2001—2020 年国际空间站累计产出的空间生命科学领域论文（仅统计 SCI 数据库收录的论文）总计 1 205 篇。2020 年（81 篇）比 2001 年（18 篇）的发文量增加了 350%，论文产出整体呈现平稳增长态势。从 2010 年起，每



年的论文产出数量均稳定在 60 篇以上,2012 年产生的论文最多,达 95 篇(见图 2)。

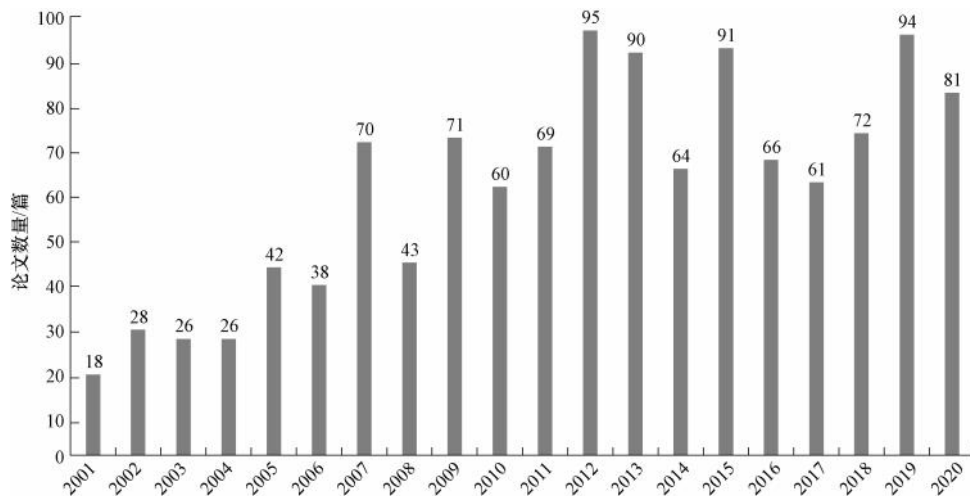


图 2 2001—2020 年国际空间站空间生命科学领域论文数量年度分布

从领域分布(按 WOS 给出的领域统计,每篇论文可能涉及多个领域)情况看,国际空间站产出的空间生命科学领域论文主要涉及多学科科学、航空航天工程、天文学和天体物理学、生物化学和分子生物学、生物学、生物物理学、生理学、运动科学等领域(见图 3)。

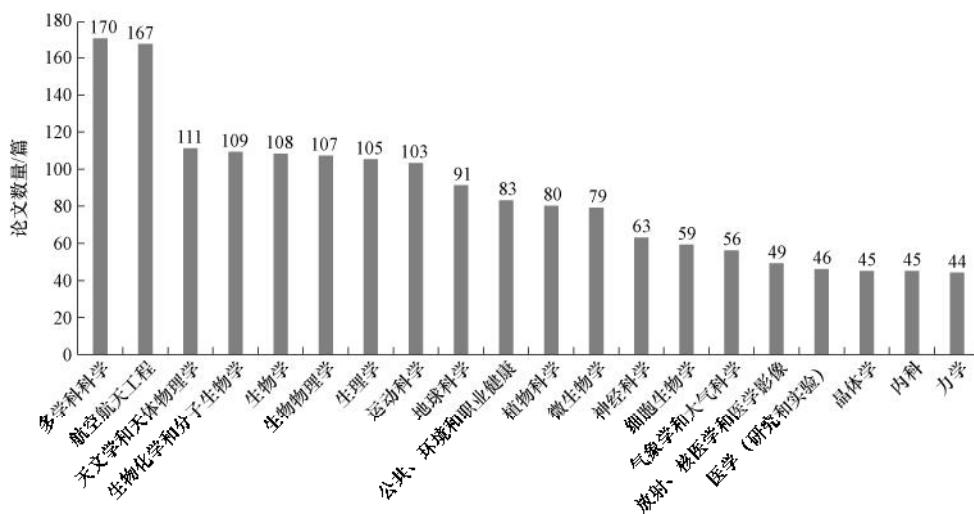


图 3 2001—2020 年空间生命科学领域论文数量按领域分布情况



2020 世界载人航天发展报告

共有 46 个国家和地区参与了国际空间站空间生命科学研究。论文和引文可以分别从研究规模和影响力水平两个角度反映参与国家研究水平的主要现状。2001—2020 年空间生命科学领域主要国家的论文数量、被引频次统计数据（表 3）表明：美国在国际空间站相关空间生命科学研究中保持绝对领先地位，发文量远超其他论文产出 TOP 10 国家的发文量总和，占该领域论文总量的 55.2%。美国产出论文的被引频次也遥遥领先，其影响力规模远高于其他国家。2001—2020 年美国的总被引频次是排名第二的日本的 4.5 倍，其绝对优势令其他国家在短期内望尘莫及。此外，美国还在庞大的研究规模基础上，获得了高达 34.05 次/篇的篇均被引频次。日本、德国、俄罗斯、意大利的产出规模处于第二梯队，发文量均超过 100 篇，在世界范围内具有较高的影响力。法国、加拿大、比利时、荷兰、英国发文量处于第三梯队。上述国家也是被引频次最多的国家。

表 3 2001—2020 年空间生命科学领域主要国家相关数据

（单位：论文数量/篇，被引频次/次，篇均被引频次/（次/篇））

国家	论文数量	世界排名	被引频次	世界排名	篇均被引频次
美国	666	1	22 677	1	34.05
日本	198	2	5 009	2	25.30
德国	168	3	4 610	3	27.44
俄罗斯	150	4	2 118	5	14.12
意大利	125	5	2 508	4	20.06
法国	98	6	1 806	6	18.43
加拿大	71	7	1 172	9	16.51
比利时	69	8	1 510	7	21.88
荷兰	53	9	1 315	8	24.81
英国	36	10	969	10	26.92
西班牙	33	11	801	12	24.27
瑞士	25	12	668	13	26.72
瑞典	19	13	314	17	16.53
澳大利亚	18	14	508	14	28.22
奥地利	16	16	474	15	29.63



续表

国家	论文数量	世界排名	被引频次	世界排名	篇均被引频次
丹麦	16	16	298	18	18.63
捷克	12	18	156	22	13.00
挪威	10	19	180	21	18.00
保加利亚	8	20	134	25	16.75

表 4 显示了 2001—2020 年空间生命科学领域高被引论文排名 TOP 9 国家及其高被引论文数量占世界总量的份额和占本国总量的份额。为了避免统计结果的偶然性，这里的高被引论文指 2001—2020 年发表的论文中被引频次位于每年前 10% 的论文，共计 122 篇。入选高被引论文排名 TOP 10 的国家与论文排名 TOP 10 国家基本一致，总体看，研究规模越大的国家高被引论文数量越多。美国在高被引论文方面表现更为突出，高被引论文占世界总量的份额超过八成（82.8%）。日、德两国高被引论文数量占据排行榜的第二、第三名，占世界份额均超过 10%（表 4）。

表 4 2001—2020 年空间生命科学领域高被引论文国家排名（单位：篇）

国家	总计	份额 A	份额 B
美国	101	82.79%	15.17%
日本	19	15.57%	9.60%
德国	17	13.93%	10.12%
意大利	7	5.74%	5.60%
俄罗斯	6	4.92%	4.00%
比利时	6	4.92%	8.70%
荷兰	5	4.10%	9.43%
法国	4	3.28%	4.08%
西班牙	4	3.28%	12.12%

注：份额 A 指占世界高被引论文比例，份额 B 指占本国论文比例

空间生命科学领域保持着活跃的国际合作。其中，美国的合作研究最多最广泛，在国际合作网络中位于中心位置，其主要合作伙伴是德国、日本和



2020 世界载人航天发展报告

俄罗斯。俄罗斯、日本、德国等也开展了大量合作研究。

研究机构方面，美国研究机构在空间生命科学领域的研究实力无可撼动：论文数量排名 TOP 10 的机构中有 7 家美国机构，俄罗斯科学院、日本宇宙航空研究开发机构、德国宇航中心分列第 2、3、7 位；在被引频次排名 TOP 10 的机构中美国更是包揽了前 5 席。NASA 无论在论文数量还是在被引频次上都遥遥领先于其他机构。加州大学、威尔实验室、得克萨斯大学、德国宇航中心等机构均同时出现在论文榜和引文榜前列（表 5）。

表 5 世界论文排名 TOP 20 科研院所发文量、被引频次及篇均被引频次数据

机构	国家	论文数量	世界排名	被引频次	世界排名	篇均被引频次
美国国家航空航天局	美国	271	1	8 481	1	31.30
俄罗斯科学院	俄罗斯	113	2	1 475	9	13.05
日本宇宙航空研究开发机构	日本	107	3	1 451	10	13.56
加州大学	美国	100	4	3 350	3	33.50
威尔实验室	美国	72	5	3 492	2	48.50
得克萨斯大学	美国	64	6	2 796	4	43.69
德国宇航中心	德国	55	7	1 912	7	34.76
科罗拉多大学	美国	54	8	2 057	5	38.09
加州理工学院	美国	38	9	687	21	18.08
佛罗里达大学	美国	38	10	808	18	21.26
东北大学	日本	34	11	1 086	14	31.94
贝勒医学院	美国	29	12	1 704	8	58.76
国家研究委员会	意大利	29	13	833	16	28.72
休斯敦大学	美国	29	14	823	17	28.38
欧洲航天局	欧洲	27	15	787	19	29.15
罗马第二大学	意大利	24	16	423	51	17.63
西班牙国家科学研究委员会	西班牙	23	17	477	45	20.74
哈佛大学	美国	23	18	1 291	13	56.13
罗马琳达大学	美国	22	19	489	44	22.23
俄罗斯公共卫生部	俄罗斯	22	20	494	40	22.45



四、国际空间站空间生命科学实验研究重要成果解析

美国宇航学会（AAS）、NASA 和空间科学促进中心（CASIS）联合召开年度“国际空间站研究和发展大会”，现对大会近年来遴选出的空间生命科学领域最受瞩目研究成果和最佳创新研究工作分析如下。

（1）NASA 研究团队开展的“一碳”（One Carbon）实验首次发现了空间飞行导致视觉变化的遗传倾向。约有 20% 的国际空间站航天员会在飞行结束后发生视觉变化，因此该研究对于发现这种变化的原因并为未来深空任务找到更有针对性的措施非常重要。一碳实验通过评估参与一碳代谢的酶的多态性作用，研究空间飞行后视觉障碍和颅内压增高的风险。该团队研究了 49 名航天员血液样本中一碳途径酶的 5 种多态性，发现 2 种多态性与空间飞行导致的视觉变化之间存在关联。统计模型显示，维生素 B₁₂ 缺乏和遗传学因素是观察到的多种眼部问题的重要预测指标。该团队将进一步探索补充维生素 B 的潜在效果，并评估有类似视觉问题的病人的一碳途径基因多态性。

（2）JAXA 研究团队开展的“JAXA 蛋白质晶体生长”（JAXA PCG）实验通过对在国际空间站上生长的高品质蛋白质晶体开展结构分析，成功阐明了牙周病原体转换能量源的方式。国际空间站的微重力环境为生长高品质蛋白质晶体提供了绝佳条件，对这些晶体结构的分析可用于设计新药和新型工业催化剂。该项研究成果有助于开发针对牙周病原体的抗菌剂。

（3）iXpressGenes 公司开展“用于中子晶体学的蛋白质晶体”（PC4NC）实验，生长焦磷酸酶晶体，并研究晶体的中子衍射。国际空间站的微重力环境为获得酶的大晶体提供了可能，通过研究晶体结构有助于确定蛋白质的功能及其参与疾病的过程。

（4）两项在国际空间站上开展的实验研究了长期空间飞行对心脏功能和大脑供血血管的影响。“从国际空间站返回时的心脑血管疾病防治”实验首次直接衡量了日常活动减少与约一半航天员在返回地面时发生的血压控制障碍之间的关联，并观测到由于血压变化造成脑血管活动降低，这也可能导致航天员回到正常重力环境下发生晕眩。“长期空间飞行导致的心血管健



康问题”（Vascular）实验研究日常活动减少对心血管健康的影响，对航天员的动脉和血液中的生物标志物进行了详细研究。结果显示，6 个月的空间飞行后，颈总动脉硬度增加的程度与正常老化 10~20 年接近。另一项重要发现是血液标志物显示发生了胰岛素抵抗，而胰岛素抵抗与 II 型糖尿病和心脏病相关。研究显示即使是身体非常健康的航天员在长期空间飞行后也会发生心血管健康问题，包括晕眩风险、动脉硬化增加和胰岛素抵抗等，这些研究对于开发更好的措施保障航天员健康以及利用这些知识帮助地面上的人类非常重要。

(5) “生物测序仪”实验旨在测试利用微型测序仪在空间中开展传染病诊断、识别微生物，并更好地了解航天员发生的遗传变化。2016 年，NASA 航天员 Kate Rubins 利用 MinION 微型测序仪在国际空间站上成功完成首次微重力条件下的 DNA 测序。利用该测序仪，样本不再需要冷冻并返回地面分析，而是在采集后立即在轨开展分析，并将数据传输回地面。这一扑克牌大小的测序仪还可以帮助偏远地区缺乏资源的医生开展工作。

(6) “空间中小鼠的转录组分析和生殖细胞发育分析”实验研究了在国际空间站上的多重人造重力研究系统中生活了一个月的雄性小鼠的基因表达模式变化情况。实验发现，暴露于微重力下的小鼠对水的消耗更多，肌肉损失更多，骨密度下降程度更大，而处于模拟地球重力下的小鼠则没有发生这些变化。研究人员认为，结果显示减重力是航天员某些健康问题的起因，这些结果也是首个证明增加重力可预防骨密度和肌肉质量减少的证据。

(7) “空间飞行对心血管干细胞功能的影响”实验阐明了在微重力环境中，干细胞在心脏生物学和组织再生以及老化过程加速中的作用，旨在为心衰患者开发更好的干细胞疗法。

(8) “响应微重力诱发头向侧体液再分布的脑血管自主调节和静脉流出”实验结果显示，开展长期空间飞行后的航天员大脑中央沟频繁收缩，大脑向上移动，头部上表面的脑脊液空间变小。为确定这些变化的持续时间和临床意义，还需要进一步开展研究。

(9) “啮齿类动物研究-5-NELL-1 系统治疗骨质疏松症”实验利用小鼠测试新药 NELL-1，以修复骨骼并预防骨丢失。该项研究可造福航天员和罹患



骨质疏松症或其他骨丢失疾病的病人，极具转化应用潜力。

(10) “用于空间飞行疲劳评估的个性化实时神经认知评估工具包”实验包括 10 个简短的、程序化的测试，用于评估与空间飞行相关的身体变化（如微重力引起的睡眠障碍）如何影响认知能力，并可及时反馈当前和过去的测试结果。实验验证了疲劳测试的灵敏性及其空间应用的有效性。未来的空间任务可以利用该软件更有效地评估航天员的绩效，某些需要评估疲劳等压力因素是否影响了人的思考和行动能力的地面应用也可获益。

(11) 肌肉萎缩最常见的治疗方法需要每天注射，休斯敦卫理公会研究所与诺华公司以及 Nanomedical Systems 公司合作，开发出一种可植入设备，可在很长一段时期内安全地管理药物，从而避免了频繁注射，并改善生活质量。在国际空间站美国国家实验室开展的一项啮齿动物实验证明了这种可植入纳米通道药物运输系统在缓解由微重力引起的肌肉萎缩的有效性。

(12) 在拟南芥模型植物中发现，草食动物（毛虫）啃食和机械损伤（切叶）的压力触发了拟南芥植株中谷氨酸的释放，用作“伤口信号”。该信号提醒附近有叶片受损，并启动植物的防御机制。这一成果更好地解释了植物对压力的响应，不仅可以帮助科学家确定哪些植物最适合应对长期空间飞行带来的压力，还可以帮助改善地球上的植物生长。

(13) LambdaVision 公司利用国际空间站美国国家实验室的微重力条件来改善其基于蛋白质的视网膜植入物的制造工艺，该技术能恢复视网膜变性患者的视力，从而影响地球上数百万人。目前，尚无法治愈两种最常见的视网膜变性类型（年龄相关黄斑变性和色素性视网膜炎）的患者。LambdaVision 的视网膜植入物由多层光激活蛋白组成，但重力会干扰层的均匀性。通过在空间中开发相关制造工艺，LambdaVision 希望通过提高多层系统的整体均匀性和稳定性来提高效率，并实现更高质量的视网膜植入物。

(14) JAXA “希望”号实验舱（Kibo）“多重人造重力研究系统”（MARS）利用离心机为国际空间站上的啮齿动物研究提供人工重力环境。MARS 使重力对比更加精确，近期还首次在轨演示了小鼠在低重力条件下的生活。在 NASA-JAXA 的合作中，MARS 被用于啮齿动物研究，以揭示视觉障碍的背后机制。



五、结束语

国际太空探索协调小组（ISECG）第三版《全球探索路线图》重申，以开展火星探索为共同驱动力和目标，拓展人类在太阳系的活动范围，月球已经成为人类飞出地球开展空间探测的首选目标。载人登月和驻留以及载人火星探索将遭遇更多困难和挑战，亟待空间生命科学研究提供更多理论支撑和技术支持。国际空间站有望运行至 2030 年，未来仍将不断产出空间生命科学重要发现和突破，助力人类在新的历史时期实现近地轨道以远的长期稳定存在。

（中国科学院科技战略咨询研究院）

NASA 载人飞船海域回收搜救 方案及任务实践

一、发展背景

载人飞船的安全返回着陆与搜救是载人航天飞行任务的最后一个环节，关系到航天员的生命安全，也是载人飞行任务成败的关键。目前 NASA 对于猎户座飞船、SpaceX 公司对于载人龙飞船都采用海面回收方式。NASA 认为海面回收具有以下特点：溅落回收点备选范围大，对飞船返回精度要求低，飞船或航天员在出现紧急情况时可随时返回，即便偏离预定地点较远亦可；飞船降落时只需使用降落伞将速度降低到 10 米/秒即可，溅落时可利用海水的缓冲力将速度降到零；美国部署在太平洋和大西洋的海军及设施设备可直接服务于海上回收任务。但海面溅落的缺点是海面气象条件比较复杂、不易预测；飞船会有进水沉没的危险；增加了航天员晕船的可能性；航天员在海面等待时间较长，海面颠簸，自救较为困难。

为了有效保障猎户座的海面溅落回收与搜救任务，NASA 沿用了阿波罗项目时期的海面回收与搜救模式，即联合美国防部三军、飞船主承包商及其载人任务计划下的项目承包商制定了兼容性较强的操作规程与实施方案。从 2009 年星座计划时起至今，进行了多次应对性演练，总结经验教训，不断加以完善。该规程与方案同样适用于 NASA 商业乘员项目下的 SpaceX



载人龙飞船和波音星际客船飞船（虽然星际客船主要采用陆地着陆方式，但 NASA 仍要求波音开展海面溅落回收搜救流程的演练，以备意外之需）。除了针对 3 种飞船的不同任务要求与技术特点而需少量适用修改外，总体回收搜救操作流程及配套设备是相同的。该规程与方案在 2014 年 12 月猎户座飞船首次探索性飞行试验任务（EFT-1）和 2019 年 3 月龙飞船首次无人飞行测试任务（Demo-1）中取得了良好效果，从而为后续开展真正的空间探索与返回任务奠定了坚实基础。

二、回收搜救参与方与主要设施设备

（一）任务参与方

载人飞船海面溅落回收与搜救工作由 NASA 探索地面系统部主管，参与团队包括 NASA 地面系统研发与运营项目部、国防部载人航天飞行保障办公室搜救处、海军第 12 特种舟艇海豹支援部队及第 3 爆炸军械处理移动部队的潜水员、空军第 45 航天联队第 3 支队与气象专家、水域伞降回收救援专家、医疗人员以及来自肯尼迪航天中心、约翰逊航天中心和洛-马公司（或 SpaceX 公司）的工程师与技术人员，开展飞船和航天员溅落后的安全回收与搜救、将航天员安全送回陆地等任务。

针对猎户座飞船发射与上升中止救援操作，NASA 要求空军配置 3 个回收搜救小组，分别为卡纳维拉尔角南端帕特里克空军基地的 6 人组、南卡罗来纳州查尔斯顿空军基地的 9 人组、夏威夷空军基地的 9 人组。

（二）主要回收搜救设施设备及装置

NASA 针对载人发射与飞行任务中的猎户座飞船海面回收搜救，主要应用了 4 类设施设备及配套装置。

（1）海军两栖船坞登陆舰（LPD）。LPD 方式的优点在于其运行成本低、配置了高性能的跟踪雷达、能在飞行甲板上起降直升机，以及舰体尾部设有一个可供着陆飞行器或其他两栖车辆进出的大门。NASA 自 2013 年 8 月以



来在 9 次培训演练中先后使用了阿灵顿、安克雷奇、新奥尔良、约翰·穆萨等数艘 LPD。

(2) 救援打捞船。NASA 和国防部在舰载吊车备用方案中还使用了一艘安防级救援打捞船——“救难者”号。该船主要停留在溅落区，以作为在无法将乘员舱拖曳到运输舰的甲板时进行舱体起吊并放置在该船甲板或在水面条件太恶劣而无法实施吊放时将乘员舱拖曳到较为平静海域的备用方案。

(3) 小型舟艇。NASA 使用了不同类型的小型舟艇：海军潜水员的硬壳橡皮突击艇、其他回收搜救人员的刚性充气艇以及协助 LPD 保持平衡与减少海浪影响的舟艇。

(4) 运输机。主要用于在空中提供导航以及救援人员和物资的 C-130、C-17 飞机。

(5) 辅助性回收救援设备和装置。包括：稳定乘员舱并使其负载均衡的稳定卡环；控制乘员舱横向和纵向移动的“马颈圈”装置；应急辅助防护线缆的“小型颈圈”；人员快速部署与临近的“前端门廊”式充气应急救生筏；肯尼迪航天中心样型实验室的“缆索荷载衰减机械组件”；乘员舱的拖曳缆绳系结点及拖曳销子组件；回收舰甲板上用作垫层的橡胶减振装置；拖曳舱体的卷扬机；可放置乘员舱体的托架索具；飞船定位的便携式搜救卫星辅助跟踪信标；用于定位及与航天员联系的轻便式机载回收系统；乘员舱回收吊架装置的气囊系统等。

SpaceX 公司的 2 艘回收救援船——“搜寻者”和“领航者”则是隶属该公司的佛罗里达回收船队，其他设备和装置大体与猎户座的基本相同。

三、影响飞船回收搜救的关键因素

NASA 针对载人飞船的返回溅落与回收制订了严格的操作标准，这是直接影响飞船回收搜救的关键因素。

(一) 搜救时间

在正常情况下，飞船乘员舱仅能确保航天员在舱内停留 24 小时，这是



2020 世界载人航天发展报告

基于生命保障时限的设计要求。如果在救援人员抵临之前，航天员停留在乘员舱内无法出舱，则其存活时间只有约 24 小时。

在乘员舱关机后，其内部的冷却系统能确保舱内的可承受温度持续 2 小时。如果搜救团队需要更长时间才能抵达溅落区域，舱内的一个潜水风扇则可为航天员提供新风。在这种情况下，需要对舱体进行有毒氨和肼的清除，并通过 3 个传感器确认溅落区域免受有毒蒸汽的影响。

研究表明，相对于提前驻留在海面的某个点位，将救援小组配备在陆域则会更加高效。由于乘员舱有可能会溅落到海面上的任一点位，因此海上救援小组需花费更多时间才能抵临乘员舱位置。大型船只海上航行速度通常为 20 节/小时，而陆域救援小组则可乘坐时速可达约 483~644 千米/小时的飞机直接抵临救援现场。

（二）乘员舱溅落时的体位

载人飞船乘员舱溅落到海面一般会呈现 3 种体位：一是保持乘员舱头部向上；二是乘员舱翻转后头部向下（即热防护罩端朝上）；三是乘员舱向一侧倾倒。如果乘员舱呈现第二种体位时则会对舱内的航天员形成更大应力，这也是需要尽快抵临救援现场的最重要原因。

阿波罗登月计划时期曾出现了 2 次乘员舱翻转后头部向下的情况：阿波罗 7 和阿波罗-天空实验室 4 任务。乘员舱溅落时如果出现头朝下或侧倒的情况，则激活乘员舱的直立系统将打开 5 个橙色气囊使其恢复“头朝上”的体位，并防止天线进水，该激活过程大约不到 4 分钟。

（三）发射中止的 200 海里搜救范围

200 海里（约 370 千米）救援范围线并不是必须遵守的限制条件，但对于月球探索任务中的猎户座飞船，其更偏东向的飞行轨迹必须保持 200 海里的救援范围线。

如果发射中止情况下的乘员舱溅落在大西洋下靶场 202 海里或 210 海里范围内，在经过发射操作人员对速度等综合分析评估后，帕特里克空军基地的救援小组也可前往乘员舱进行救援，而无需南卡罗来纳州查尔斯顿空军基



地的救援小组。目前，NASA 和国防部未将印度洋作为紧急溅落区，需要时则由夏威夷空军基地的救援小组负责该区域的救援。

（四）天气和海况

海上救援面临的一个重要问题是天气和海况。有些天气限制条件必须遵守，如对于降落伞系统，不能在出现雷电情况下打开降落伞系统，而密集降雨也会影响到降落伞的实际运行。如果海况变化太大，救援团队就不得不权衡所面临的风险以及在这种状况下能够生存的后果。NASA 和国防部制订了一整套减缓风险与可接受风险的措施，救援团队可在发射和返回着陆日当天，对所跟踪的整个飞行航线的全球气象情况进行查阅，分析研究是否可实施返回溅落与救援，并做出最终决策。

对于发射台发射中止或发射起飞后即刻中止的情况，气候条件变化均属于 NASA、国防部可接受范围。但对于下靶场航区内的任务中止将导致乘员舱溅落到大西洋的气候变化范围，NASA 和国防部必须在发射前进行预案应对，分析在乘员舱溅落到海域的气候变化范围中可能面临与可接受的风险，包括推迟发射、基于救援人员安全而推迟救援或将救援小组从风险天气环境中撤离。

（五）发射当天的回收搜救

在发射当天，如果出现诸如发射设施、火箭及飞船的硬件故障或航天员健康等紧急情况而须执行发射台或上升中止时，飞船及航天员将溅落在距发射台数百千米（实际距离将依执行中止的具体情况而定）外的美国东部大西洋或印度洋海面上。

帕特里克空军基地的 6 人搜救小组负责卡纳维拉尔角 200 海里范围内的发射中止救援，主要进行发射台中止或飞行中止后前 2~3 分钟内的操作。发射任务中止后，救援小组抵临乘员舱，将航天员救出，并需在 6 小时内将航天员运回地面。发射当天，救援小组使用 HH-60 救援直升机或 C-130 运输机部署救援区域内的设备，并始终处于待命状态，同时设定了一个 15 分钟警戒程序以随时起飞。



2020 世界载人航天发展报告

南卡罗来纳州查尔斯顿空军基地的 9 人救援小组将负责卡纳维拉尔角 200 海里范围外的发射中止救援，主要为穿越大西洋上空至爱尔兰岛海岸的发射飞行轨迹范围。该救援小组使用比 C-130 更大、飞行速度更快的 C-17 运输机，以尽早抵临乘员舱。

根据猎户座飞船进入其初始轨道的具体位置，飞船入轨后前数分钟的紧急着陆点应为太平洋，而在该区域内的救援则由夏威夷空军基地的 9 人救援小组负责。夏威夷救援小组也使用 C-17 运输机救援。

（六）航天员的搜救

根据 NASA 载人飞行任务的要求，航天员的搜救与出舱既能在开阔海面，也可在舰体井甲板内，具体方案需根据乘员舱返回当天的海域实际状况而定。NASA 针对两种情况制定了相应的处置措施，回收搜救团队和任务控制团队可结合航天员的健康状态、天气情况以及回收搜救团队与设备在海面面临的实时环境进行灵活处置。在飞船溅落过程中，航天员将通过卫星电话与进行搜救协调的任务控制人员保持联络。

NASA 要求回收搜救团队的首要任务是搜救航天员，而非乘员舱，这意味着如果飞船乘员舱溅落到距发射场数百千米或数千千米的降落点，回收搜救团队只需救援出航天员即可完成任务，而任由空置的乘员舱漂浮在海面上，舱体的打捞回收则由其承包商负责完成。

1. 开阔海面上的航天员救援与出舱

针对在开阔海面的航天员逃生搜救，海军潜水员首先在舱体底部四周安装一个稳定卡环以稳定舱体，然后在舱门前部安装一个充气式前沿救生筏，然后将航天员从舱内救出，等待救援船只或直升机前来将他们运回地面。前沿救生筏能保障 9 人救援小组和 4 名航天员在海面上维持 72 小时，此外还可用作受伤航天员的医疗救治设施。

如果出现乘员舱溅落到偏离预定落区、海域恶劣状况使回收搜救团队无法及时抵临舱体或海水已侵入乘员舱等情况，航天员必须能自行打开舱体的侧舱口，抛掷和展开救生筏，然后乘坐救生筏离开乘员舱，并同时等待回收



搜救团队的到来。

2. 回收舰（船）井甲板上的航天员出舱

对于在回收舰（船）井甲板上的航天员出舱，当乘员舱溅落后可使航天员继续驻留在舱内，在将飞船拖曳到回收舰（船）井甲板并进行稳固后，再进行航天员出舱程序。届时需要放置一个航天员逃生平台供回收搜救人员临近舱体进行航天员的出舱，并对航天员进行全面的医疗评估和临时就地医治，随后将他们运回岸上以实施后续恢复。

四、演练培训与任务应用

（一）培训演练

NASA 从 2009 年就开始了猎户座飞船的全尺寸乘员舱模型的无浪和海面溅落回收搜救演练与评估，以确定包括配套设施设备和人员在内的飞船及航天员溅落回收搜救及医治方案。2011 年后，NASA 继续开展飞船溅落回收与搜救的操作程序以及配套设施设备的验证与完善，并采取“爬”（静态）、“走”和“跑”的三个阶段累加式策略，以了解和掌握不同海域状况对回收搜救过程的影响，研究无浪和有浪条件下回收搜救飞船的区别以及可能遇到的物理限制。

截至 2020 年 5 月，NASA 共实施了 8 次飞船溅落回收搜救测试演练（包括 2014 年 12 月猎户座飞船首次试验飞行），主要内容包括：回收搜救流程、规程、配套设施设备的验证与评估，舰上、舰-岸间通信导航的评估，以及可为改进回收搜救方案提供技术支持的时控数据。此外，NASA 还在约翰逊航天中心中性浮力实验室水槽内以及墨西哥湾海域穿插进行了数次航天员逃生与搜救训练。每次演练都能使回收搜救团队获得重要的数据，以对回收搜救及设施设备加以改进完善，如 URT-6 最快能在 15 分钟内完成一次回收搜救，这个速度对载人任务非常重要，因为该类任务的最优先要义是以最快速度和最短时间安全搜救航天员；URT-7 则进行了首次夜间回收搜救演练；航天员



2020 世界载人航天发展报告

可在回收搜救团队无法提供帮助下，在 3 分钟内自行逃离乘员舱并乘坐救生筏。

随着商业乘员项目的航天员搜救方案逐渐成形，NASA 从 2018 年 5 月起，陆续率领由国防部三军、SpaceX 公司和波音公司组成的回收搜救团队进行一系列针对性的回收与搜救演练与实操，包括 SpaceX 搜寻者回收救援船在大西洋海面的直升机降落测试、星际客船飞船在大西洋海面的首次演练、载人龙飞船首次无人试验的海面溅落、2 名 NASA 航天员参与星际客船飞船在大西洋海面的演练、载人龙飞船发射逃逸试验后的海面溅落回收等。

（二）EFT-1 任务的猎户座飞船回收搜救

2014 年 12 月 6 日，NASA 联合洛-马公司及国防部三军成功实施了猎户座飞船首次试验飞行的太平洋海面溅落回收搜救。

1. 前期准备工作

NASA、洛-马公司及国防部三军的回收搜救人员在 12 月 5 日发射前乘坐安克雷奇两栖运输舰和“救难者”救援打捞船前往预定的太平洋溅落回收搜救区，并进行回收区周围的气象状态监测。同时，NASA 的伊哈纳无人机从阿姆斯特朗飞行研究中心起飞，并停留在溅落回收区上空约 8 230 米高度，对飞船穿越大气层过程进行实时红外线和视频图像采集，并传送到肯尼迪航天中心任务主任中心和休斯敦任务控制中心。海军直升机海上作战大队的飞行员驾驶 2 架海鹰直升机从安克雷奇运输舰甲板起飞，对飞船溅落和分离过程进行热图像采集，同时搜索飞船溅落海面时的位置，并将相关信息反馈到安克雷奇舰。

2. 猎户座乘员舱的回收搜救

在乘员舱降落过程中，休斯敦任务控制中心陆续将溅落点信息通过舱体信标发送给舱内航天员。乘员舱溅落 1 小时后，飞行控制团队将飞船控制权移交给回收搜救团队，启动回收搜救程序。海军潜水员乘坐刚性充气艇和硬壳橡皮突击艇前往溅落区，完成舱体热防护罩的水下图像采集以及舱体搜救设备的系捆后，将乘员舱拖曳到安克雷奇舰内，将舱体安放到专用托架装



置上。

同时,其他回收搜救人员仍继续回收海面上的飞船前舱盖和 3 个降落伞,并运到回收舰,然后通过吊车起吊到主甲板上,以供后续性能分析与数据采集。降落伞经过脱水烘干运回供应商处以备检查。

3. 乘员舱运回肯尼迪航天中心及内部系统卸载

NASA 要求尽可能早地在回收舰上进行数据恢复,但若没有关键的时间性设备,则可在入港处或飞船内部系统卸载地进行。12 月 8 日,回收搜救团队随同安克雷奇舰和“救难者”号船返回圣地亚哥港,开始乘员舱运回肯尼迪航天中心的准备。

在乘员舱运回肯尼迪航天中心多用途有效载荷厂房后,进行舱内系统卸载。首先将舱体进行清洁并放置到卸载台上,拆除密封装置、非关键时间性设备,进行数据恢复,启动卸载程序。完成内部系统卸载后,将舱体连同拆除的部件运到操作与检测厂房,最后运回洛-马公司进行飞行后的设备处理与分析研究。

(三) Demo-2 任务的载人龙飞船回收搜救

2020 年 8 月 2 日,SpaceX 载人龙飞船在顺利完成 64 天与国际空间站对接期间的空间试验任务后,再次携带 2 名航天员返回地球,溅落在距美国佛罗里达州彭萨科拉市约 54 千米的墨西哥湾海面。这是自 1975 年阿波罗-联盟任务结束 45 年之后,美国载人飞船首次在海面返回溅落,也是航天员首次降落在墨西哥湾海面。

1. 确定溅落点位及回收搜救气象标准

NASA 和 SpaceX 根据涉及飞船溅落的若干决策性里程碑事件,如航天员进入飞船、飞船自由飞行和实施脱轨燃烧等,从包括彭萨科拉、坦帕、塔拉哈西、巴拿马城、卡纳维拉尔角、代托纳和杰克逊维尔在内的 7 个可供溅落点位中确定主选和备选溅落目标位置。技术团队将结合每个决策性里程碑事件对主选和备选溅落点位的气象条件进行评估,以此决定这些点位是否具备溅落和回收的条件。



2020 世界载人航天发展报告

技术团队按照“确定优先事项”原则选定溅落点位，即根据飞船脱离 ISS 的日期和时间以及各个溅落目标点位的天气变化所计算出的最大返回溅落概率。同时还根据轨道力学以及在白天时段实施飞船溅落的概率，对能完成最短的飞船脱离与溅落回收过程的点位进行优先排序。此外，载人龙飞船可通过其天龙座推进器完成一系列降轨机动，以使地面设备能对每个主溅落点位进行有序跟踪，从而保持飞船在自由飞行过程中可根据气象限制条件要求而更换到备选溅落点位的能力。

2. 载人龙飞船及航天员的回收搜救

搜寻者和领航者分别停留在墨西哥湾和大西洋海域，配载 44 名 SpaceX 和 NASA 的人员，包括双方官员、飞船工程师、水域回收专家、医疗专家、船员、NASA 货运专家及其他协助回收的人员。

载人龙飞船溅落墨西哥湾海面数分钟后，载着 SpaceX 回收救援团队的 2 艘快船抵临飞船。第 1 艘船主要检查飞船的完整性，并检测其周围的自燃推进剂蒸汽情况，在完成相应的清除后开始回收准备。第 2 艘船主要负责回收飞船降落伞。在确认飞船处于安全稳定状态后，“领航者”回收船驶临飞船，开始起吊飞船。30 分钟后，将飞船放置到甲板的稳定装置上。SpaceX 回收团队随后对飞船外部的四氧化二氮（毒性）含量升高水平进行检测并加以吹除，以清除其周围的毒性物质。美国东部时间 15 时 59 分，打开飞船舱盖，10 多分钟后协助 2 名航天员出舱，然后在船上的医疗区进行初步医疗检查。整个回收搜救过程约耗时 45~60 分钟，但实际时长仍需根据飞船状态和海况而定。

3. 运送航天员及飞船回港

在完成航天员的初步医疗检查后，回收船将他们转运到直升机上，最后返回艾灵顿·菲尔德空军基地机场。通过直升机将航天员运回海军基地港口的方式可适用于除卡纳维拉尔角外的所有溅落点，其行程时间约在 10~80 分钟，主要根据溅落点位与港口间的距离远近（约在 40.74~324 千米）而定。

在将 2 名航天员安全送离后，领航者回收船则继续携载龙飞船并经过 5 天行程返回卡纳维拉尔角港，然后进行飞船的卸载。SpaceX 回收团队随后将



飞船进行分解，以分析其在整个任务中的运行情况。

五、结语

载人飞船的整个回收搜救过程是一项高风险、处于不断变化中的活动，如果任何一个环节出现偏差，都会导致任务失败。NASA 将通过阿波罗登月、航天飞机等载人计划所积累的大量飞船回收搜救经验教训应用于未来猎户座和商业乘员飞船的空间探索任务，认为其与美国国防部三军联合开展飞船及航天员的回收搜救将是确保载人飞行任务获得最终成功的一种高效保障措施，同时双方的合作还能进一步降低整个回收搜救的成本。此外，NASA 还认为开展多次回收搜救培训演练能更加深入地了解 and 掌握飞船的技术性能，并通过尽早介入培训演练及所积累的经验为猎户座飞船以及载人龙飞船和星际客船飞船的后续设计研制及改进完善提供借鉴。

（北京特种工程设计研究院）

NASA 近地网新型发射通信 系统升级与任务应用

美国国家航空航天局（NASA）针对新一代太空探索系统——SLS 火箭和猎户座飞船的研制与任务需求，通过其近地网项目改建了新型发射通信系统，为加快肯尼迪航天中心的多任务、多用户型航天发射场转型提供先进技术能力。近地网主要利用 NASA 在轨卫星地面系统成熟化的商业技术与远程操作方案，以实现更高的寿命周期成本效率。

一、发展背景

NASA 近地网（NEN）目前由戈达德航天飞行中心管理，设在梅里特，连同天基网（SN）和深空网（DSN）共同构成 NASA 空间通信与导航（SCaN）中心监管下的三大空间通信网络。

肯尼迪航天中心与美空军东靶场于 2012 年 9 月发布“联合靶场未来形势方案论证研究”（FSD）报告，提出近期与远期 NASA 地面通信设施设备现代化改造升级建议，以保障新一代航天发射系统（SLS）火箭和猎户座载人飞船。

2013 年底，NASA 与美空军签署谅解备忘录，正式授权合作开展发射通信系统研制项目，并根据 FSD 报告及 SLS 火箭与猎户座飞船首次探索任务的要求对拟改建升级的发射通信系统及配套地面设施进行定义、设计、实施



与测试，其中包含 2 个永久性且设计配置相同的地面站：新建的肯尼迪航天中心上链路地面站（KUS）与改建后的梅里特岛庞塞·莱昂数据与跟踪站（PDL）。2018 年初，近地网项目按照 NASA 系统工程要求完成了发射通信系统项目中的 3 个里程碑性评审，年底完成第 4 个运行准备状态评审。2019 年底到 2020 年初，KUS 正式投入运营。

二、新型发射通信系统的能力目标与运营管理

根据近地网的发展规划，发射通信系统升级后的 KUS 和 PDL 两个站点是作为东靶场的补充性设施，为美国东部沿岸航天发射场的运载火箭和新一代太空探索系统提供通信保障，主要包括载人飞行任务中航天员与任务控制人员间的重要通信链路，以及航天器飞行任务中运载火箭的遥测与轨道跟踪通信保障。主要具备以下 4 种能力。

一是首要目标是为肯尼迪航天中心、卡纳维拉尔角空军基地以及其他商业航天发射场提供特需与补充性发射通信服务，包括针对“阿尔忒弥斯-1”任务中的猎户座飞船乘员舱所用的双向 S 波段链路以及 SLS 火箭主芯级所用的 2 个高速率 S 波段遥测链路。

二是由于“阿尔忒弥斯-1”任务的发射通信用户不仅包括 NASA 合作的老用户，也涵盖即将参与该项任务的民用、商业及军事新用户，因此 KUS 还具备可为那些返回发射区或航天飞机着陆场的运载火箭和航天器提供通信保障。

三是发射通信试验与运行保障除外期间，发射通信系统还可为近地网在轨卫星任务用户提供 S 波段跟踪、遥测与指挥服务。

四是作为空间移动网的先进通信概念与技术的演示验证平台。

NASA 戈达德航天飞行中心监管发射通信系统项目的建设运营，肯尼迪航天中心通过其“21 世纪航天发射港”转型倡议向该项目提供研发资金，包括第 45 航天联队和航天与导弹系统中心在内的数家美国空军部门向发射通信系统提供相应的协助与补充性运营和保障，位于沃洛普斯飞行设施的近地网任务技术与运营团队则通过百慕大下靶场站点进行远程监控。



三、KUS 和 PDL 地面站的技术特性

(一) 天线

KUS 和 PDL 分别配备了一个 6.1 米的单体天线，能够提供多个不同的通信服务。根据合作协议，由美空军提供给 NASA 而由其整修并配置在 KUS 和 PDL 使用的天线系统可以有效地节省发射通信系统研制成本。该天线系统原本只具备 S 波段下链路跟踪能力，但通过发射通信系统项目的升级改造后，可以为任务控制人员与运载火箭或航天员间提供 S 波段上链路指令与音频数据。

(二) 信号与数据处理组件

KUS 和 PDL 配置了当前最先进的信号与数据处理部件，包括符合数据标准的软件无线电。这些信号与数据处理设备所具备的能力，能保障目前已应用于 NASA 现有任务和预期应用于 NASA 未来任务及其他民用、军用和商业用户使用的所有标准与先进带宽效率调制和编码方案。

(三) 内部 IP 接口

KUS 和 PDL 均配置了内部 IP 接口，并通过光纤与设在肯尼迪航天中心的通信分配与切换中心相连，用于保障 IP 格式的基带数据传送与接收。近地网在通信分配与切换中心内配置的设备还包括空间链路拓展网关，可以使用空间数据系统咨询委员会空间链路拓展格式传输实时数据与指令，此外还可采用空间链路拓展离线模式在接收信号后进行任务数据的检索与回放。

(四) 远程监控与调度

任务控制人员均能通过设在沃洛普斯飞行设施的近地网全球监控中心对 KUS 和 PDL 的日常运行和任务前的测试进行远程监控。此外，KUS 和 PDL 可以通过近地网调度办公室提供标准服务调度。表 1 与表 2 分别给出的是



KUS 和 PDL 的 S 波段遥测与指令技术特性。

表 1 KUS 和 PDL 的 S 波段遥测技术特性

特性	数值
频率	2 200~2 395 兆赫
天线增益/噪声温度 (G/T)	17.2 分贝/K (假定天空晴朗无云, 发射机处于 5°仰角向上状态。同时考虑来自天线罩、针点扫描/自动跟踪、速度 $\leq 5^\circ/\text{秒}$ 而加速度 $\leq 5^\circ/\text{秒}^2$ 的跟踪误差以及天线后端电子设备等若干项的损失)
偏振 ¹⁰	右旋圆 (RHC) 或左旋圆 (LHC)。右旋圆/左旋圆偏振的多样性组合 (探测前/后)
遥测解制	PM; FM; PCM/PSK/PM; PCM/ PM; BPSK; QPSK; QQPSK (SQPSK); SOQPSK; SQPN; AQPSSK
PM 调制指数	0~2.5 弧度
FM 偏差	$\leq \pm 500$ 千赫
载波信息率	100 比特率~40 兆比特率 (最大速率为调制与解码域)
载波线路编码	① NRZ: L、M、S; ② Bi Φ : L、M、S; ③ DBP: M、S; ④ DM: M、S; ⑤ R-NRZ; ⑥ V35
子载波频率	40 赫兹~128 千赫 (低带宽遥测模式); 5 千赫~2 兆赫 (高带宽遥测模式)
子载波信息率	7 比特率~25 千比特率 (低带宽遥测模式); 100 比特率~600 千比特率 (高带宽遥测模式); (调制与解码域)
子载波线路编码	① NRZ: L、M、S (低或高带宽遥测模式); ② Bi Φ : L、M、S (低或高带宽遥测模式); ③ DBP: M、S (高带宽遥测模式); ④ DM: M、S (高带宽遥测模式); ⑤ R-NRZ (高带宽遥测模式)
解码	① 1/2 Viterbi 码; ② Reed-Solomon (RS) 码 $i=1\sim 5$; ③ 级联码 (RS 码/卷积码); ④ 1/2 LDPC 码; ⑤ 7/8 LDPC 码; ⑥ 1/2 Turbo 码
数据格式	CCSDS 和 IRIG-106

表 2 KUS 和 PDL 的 S 波段指令技术特性

特性	数值
频率	2 025~2 120 兆赫
等效全向辐射功率 (EIRP)	57 dBW (最大)
偏振	右旋圆 (RHC) 或左旋圆 (LHC)
指令解制	PM; FM; PCM/PSK/PM; PCM/ PM; PCM/ FM; BPSK; QPSK; QQPSK (SQPSK); SS-UQPSK



续表

特性	数值
PM 调制指数	1~2.5 弧度
FM 偏差	≤±5 兆赫
载波数据率	7 比特率~10 千比特率 (低带宽指令模式); 100 比特率~600 千比特率 (高带宽子载波指令模式); 100 比特率~1 兆比特率 (高带宽 PCM 指令模式)
载波数据格式	① NRZ: L、M、S; ② BiΦ: L、M、S; ③ R-NRZ
子载波频率	40 赫兹~100 千赫 (低带宽指令模式); 5 千赫~2 兆赫 (高带宽子载波指令模式)
子载波数据率	7 比特率~10 千比特率 (低速率指令模式); 100 比特率~600 千比特率 (高速率指令模式)
子载波数据格式	① NRZ: L、M、S; ② BiΦ: L、M、S; ③ R-NRZ
解码	1/2 卷积码; 1/2 LDPC 码

四、新型发射通信系统的任务应用

KUS 和 PDL 的建成与现代化升级, 将为 NASA 新一代载人与机航天器空间探索系统提供强有力的任务保障, 强化近地网在轨运行保障的地面设施配置, 并将成为近地网未来设计概念与技术研发的有效试验场。

(一) 发射、上升与着陆的技术保障

发射通信系统的首要任务是为美国东海岸航天发射场提供灵活、快捷、特定和稳健的通信保障, 其中包括 SLS 火箭与猎户座飞船的“阿尔忒弥斯-1”任务以及民用、商用和军用卫星发射通信服务。这些通信保障可以通过 KUS 和 PDL 两个永久性站点加以实施, 也可与扩展性站点共同为各项任务的具体要求提供定制服务。

1. 技术保障要求

“联合靶场未来形势方案论证研究”报告提出的新型发射通信系统运营能力技术要求的 2 项近期发展建议主要基于 NASA 新一代 SLS 火箭与猎户座



飞船任务的需求，其目标是：保障遥测链路数据率至少达到 20 兆比特率；保障运载火箭和/或航天员任务的 S 波段上链路能力。

2. KUS 与 PDL 位置选定

KUS 和 PDL 的位置是 NASA 和美空军针对现有及未来空间任务的战略发展需求而设定的，以此确保为发射和上升段提供不间断的通信链路。

PDL 站点保留了原航天飞机项目时期的基础设施和土地使用协议，场区保障性能也已经过相关鉴定，使其具备较高的成效比和低风险应用的能力。KUS 作为新建站点，其选定标准涵盖针对开展“阿尔忒弥斯-1”任务以及其他军用、民用和商业运载火箭发射任务的肯尼迪航天中心和卡纳维拉尔角空军基地各发射场以及航天飞机着陆场。

KUS 是在距垂直总装厂房南面约 5 千米处的原肯尼迪航天中心环境健康厂房的场址上建造的。该点位的最佳通信视线范围可覆盖到 39B 和 39A 发射工位以及卡纳维拉尔角空军基地的 40 号、41 号、46 号及其他现役的发射场。在肯尼迪航天中心的总体发展规划中，KUS 站点的通信覆盖范围能为美国东海岸发射用户的不断增长与演进的各种需求提供有效保障。

3. “阿尔忒弥斯-1”的通信链路布设

除了 KUS 和 PDL，发射通信系统将通过近地网项目中的 7 个合作方及配属的地面站，为 SLS 火箭的发射与上升段以及猎户座飞船/探索上面级在月球转移轨道上实施分离之前的检测时段提供探索上面级遥测链路保障。

SLS 火箭主芯级设有 2 个 20 兆比特率（编码）遥测下链路，其中一个必须以非常短的延迟传送给端用户，而另一个所包含的数据可保障与表征和掌握 SLS 火箭设计技术性能相关的飞行试验和工程目标，这些数据将用于飞行任务后的分析，并可能在发射后的 72 小时提交给任务用户。猎户座飞船的 S 波段上链路包含任务控制的音频数据，此外还设有一个包含航天员音频以及乘员和火箭遥测数据的下链路。KUS 和 PDL 还针对任务控制配置了低延迟的地面网路联接，以保障猎户座飞船的上链路和下链路。



2020 世界载人航天发展报告

4. “阿尔忒弥斯-1”特定的地面设施布设

保障“阿尔忒弥斯-1”任务的5个地面站点：KUS、PDL、空军东靶场中心遥测站（Tel-IV）、乔纳森·迪金森导弹试验附属设施（JDMTA）以及NASA沃洛普斯靶场的百慕大下靶场站（BDA）。

KUS和PDL将保障猎户座飞船的S波段上链路与下链路，而Tel-IV和JDMTA两个站点则目前不支持飞船的上链路服务。这种布设要求与传统的载人航天飞行发射通信服务做法是相一致的，同时也避免了对Tel-IV和JDMTA两个站点的现有天线分系统的升级改造，节省了费用。此外，KUS和PDL还将SLS火箭的2个高速率遥测数据链路提供保障，这种布设要求可利用低延迟的地面网路联接以保障猎户座飞船的链路，同时减少了地面网路设施的应用范围与复杂性。

Tel-IV和JDMTA两个站点主要通过S波段下链路提供SLS火箭过渡低温推进上面级链路保障以及GPS和靶场安全的保障。当SLS火箭飞行移至下靶场范围后，猎户座飞船和过渡低温推进上面级的测控将从近地网地面段移交至天基网，但由于SLS火箭主芯级的2个遥测链路的高速率特性，因此仍必须通过BDA下靶场地面站进行保障。NASA和美空军在开展发射通信系统研制之初，发现沃洛普斯试验靶场无法支持SLS火箭主芯级遥测链路的先进信号特性和数据速率，随后通过复制KUS和PDL的信号处理与数据传输设计技术，使BDA下靶场地面站使用沃洛普斯试验靶场所有与运营的移动式天线将信号馈送到近地网所研制与运营的后端电子设备上，并通近地网的全球监控中心进行远程监控。

上述针对“阿尔忒弥斯-1”任务特定的发射通信系统地面设施布设反映了发射通信系统项目如何通过构建跨机构工程与运营合作，形成一个高成效比、灵活快捷、稳健和特定的通信保障方案，很好地诠释了“联合靶场未来形势方案论证研究”报告的构想目标，成为未来美国东海岸发射场用户有效开展发射飞行任务的典范。



(二) 近地任务的在轨 S 波段通信服务

发射通信系统的第二项任务是为近地用户提供在轨 S 波段通信服务。

1. 发射通信系统在 NEN 中的作用

由于近地网起源于 NASA 早期通信网——卫星跟踪与数据采集网和载人航天飞行网，因此虽然发射通信功能是发射通信系统应用的首要任务要素，但其 KUS 与 PDL 还可与应用更广泛的空间通信与导航中心和近地网项目的各项技术、运行、持续、安全以及纲领性体系结构相兼容。

KUS 和 PDL 站点的设计与布设应用了近地网在轨卫星跟踪站验证过的设计、设备与部件以及远程运营方案，而运用通用型商业化技术以及遵循国际数据标准与协议的工作思路能确保 KUS 和 PDL 可为近地网的 S 波段用户提供所需的通用型调制、解码及其他参数。此外，KUS 和 PDL 还能与近地网的通用型调度、后勤保障、安全、安防及其他相结合。

2. 在轨跟踪技术成熟度与可利用性

根据 NASA 针对 SLS 火箭和猎户座飞船的建设发展规划，发射通信系统将会为全部载人与机器人太空探索任务提供保障服务，并分别从 2017 年和 2018 年在东靶场通过各类发射任务对 KUS 和 PDL 进行验证测试与盲区运行。2019 年 4 月，NASA 在实施猎户座飞船第二次上升中止（AA-2）试验中，将 KUS 和 PDL 作为备份保障站点。

虽然发射通信功能是发射通信系统应用的首要任务要素，但由于 SLS 火箭与猎户座飞船的发射任务频率相对较低，因此在开展“阿尔忒弥斯-1”任务之前，NASA 计划将 KUS 和 PDL 首先用于在轨跟踪任务的保障。在“阿尔忒弥斯-1”任务完成后，NASA 仍继续将这两个站点用于在轨跟踪任务的日常性保障，即便 SLS 火箭与猎户座飞船的发射任务频率增加，仍将会保持这种运行状态。目前，NASA 正在将 KUS 和 PDL 纳入近地网任务规划与一体化运行流程中，以为近地网在轨跟踪用户提供 S 波段的日常通信保障。



（三）未来空间移动网方案与技术的试验平台

发射通信系统的第三项任务是作为未来空间通信运营概念与技术的试验与验证平台。相对于航天飞机时期，目前 KUS 和 PDL 站点的运行与维护成本已大幅降低，这主要源于多个因素：电子部件的小型化、通过现场可编程门阵列和商品加工源所实现的软件定义功能合并、基于软件的自动化技术的引入、国际性信号与数据标准的广泛应用以及商业空间通信部件的竞争市场的凸现等。对于 NASA 追寻先进、创新的空间通信技术如何达到事半功倍的战略发展，发射通信系统将在其中发挥着非常重要作用。

1. NASA 空间移动网的体系架构

基于地面无线移动网的先进概念与技术的启示，NASA 创新性地提出了空间移动网（SMN）体系架构概念，如图 1 所示。通过对空间通信的传统预测型点-点物理与链路层功能进行拓展，将能对动态与响应服务采集以及自主任务场景进行说明的组网与应用层功能纳入其中，以减少用户负担，从而实现更高效、更易于获取的自动化通信服务，为用户航天器提供更高网络性能。SMN 概念不仅限于近地轨道用户，还适用于地球以远的用户。

2. 面向空间移动网的发射通信系统创新

在 NASA 开展的空间通信项目中，近地网是唯一可以将 NASA 所有与运营的地面通信站点与科研院校、国际合作方以及商业地面通信站进行无缝融合的通信网。近地网在促进空间通信运营服务的商业市场发展进程中发挥着重要作用，目前它已成为 NASA 通过自营地面通信站点开展先进商业软件定义空间通信技术的早期技术验证平台。NASA 将结合 SLS 火箭与猎户座飞船的“阿尔忒弥斯-1”任务，通过升级改造后的发射通信系统地面站体系架构，对近地网如何快速地为合作方的各项任务提供更强大的技术性能、适应性与高效能力进行验证。

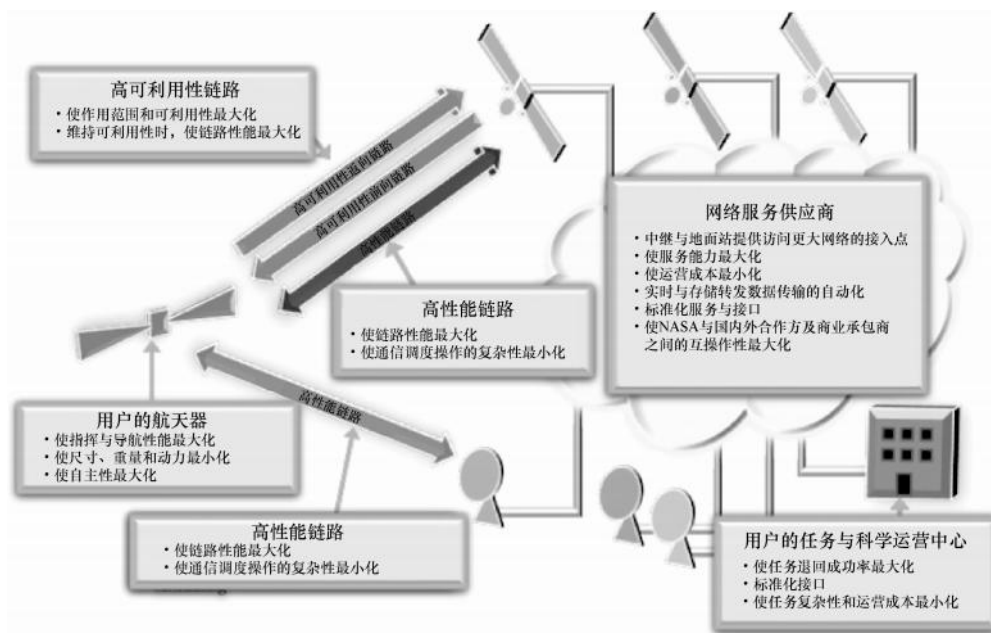


图1 空间移动网的体系架构示意图

基于上述因素，近地网和发射通信系统可以为空间移动网开展未来技术创新提供非常重要的支撑与保障。发射通信系统试验与运行验证的重点领域包括：用户初始服务、延时容忍组网、针对性能提高（多孔径）或可利用性（多要素）的地基相阵列概念、自适应和自主型链路配置、处理源虚拟化、软件定义组网以及面向区块链技术的新兴赛博安全与分布源分配应用技术。

五、结束语

NASA 正不断努力为充满挑战的空间环境选择最优的通信导航方案，对空间通信与导航的未来设想既包括推进当前技术的发展，也包括开发新能力。其未来近地网体系架构将提供新型任务能力：数据率将提高到 4 亿比特率；使用开放、国际标准化网络体系架构提供保障可靠的数据传输和更精确的光学测量跟踪能力，大大提高任务灵活性、自主性和效率；采用低成本简



2020 世界载人航天发展报告

化的网络运营管理，实现基于商业化综合通信服务保障；强化通信网络的响应性与可利用性；加强与国际伙伴和商业服务供应商的协作，以更短时间和可负担的成本满足未来新型及演进性任务的增量需求。

（北京特种工程设计研究院）

附录篇



大事记

- 1月8日，美国国家航空航天局（NASA）安全顾问委员会发布2019年度报告，对NASA在过去一年里的安全问题进行了分析评估，并对涉及国际空间站、月球与深空探索、探索系统研发、商业乘员项目、航空飞行与空中运营、安全文化以及企业保护等方面取得的成绩、突出的问题及所关注的事项进行重点性总结。

- 1月10日，NASA迎来了11名新航天员，他们成功完成两年以上的基础训练，是NASA公布“阿尔忒弥斯”计划后的首批新航天员。目前，NASA共有48名现役航天员。

- 1月20日，国际空间站第61长期考察团成员、NASA航天员杰西卡·梅尔和克里斯蒂娜·库克完成了历时6小时58分钟的出舱活动。这是2020年在国际空间站进行的第2次出舱活动，也是自建站以来的第226次出舱活动、第3次全女性太空行走、第45次有女性参与的出舱活动。迄今，国际空间站出舱活动时间已累计达59天6小时10分钟。

- 1月27日，日本内阁宇宙战略推进事务局公布了2020财年日本政府的航天预算，总额为3005亿日元，相比2019财年预算小幅增长1%。与载人航天相关的预算属于文部科学省管理，共计72.01亿日元，比往年大幅增加。其中，载人航天国际合作、载人空间探索项目为70.06亿日元，比2019年增加12.34亿日元，载人绕月项目预算为1.95亿日元。

- 2月1日，印度空间研究组织（ISRO）公布2020—2021财年预算，



2020 世界载人航天发展报告

ISRO 为其载人航天计划 Gaganyaan 申请大约 5.76 亿美元的经费，但是政府仅批准 1.62 亿美元。尽管得到的经费比较少，但 ISRO 表示仍将按计划开展载人航天计划。

- 2 月 10 日，NASA 公布了 2021 财年预算申请，预算总额超过 250 亿美元，主要用于空间探索的创新性项目，同时保持对 NASA 完整的科学研究、航空和技术工作的有力支持。2021 财年预算比 2020 财年预算增加了 12%，使之成为 NASA 史上最高预算之一。

- 2 月 13 日，俄罗斯能源火箭与航天集团公司公布了雄鹰号新型载人飞船的飞行计划：雄鹰号载人飞船的首次无人试飞日期定于 2023 年 9 月，将完成与国际空间站的对接；2025 年 9 月进行首次载人飞行，与国际空间站交会对接；之后，雄鹰号飞船于 2026 年和 2027 年将继续进行载人飞行；2028 年将首次使用叶尼塞超重型运载火箭进行飞行，2029 年绕月飞行，2030 年实现载人登月。

- 2 月 16 日，诺-格公司利用安塔瑞斯-230+ 运载火箭从沃罗普斯发射场成功发射天鹅座货运飞船，为国际空间站运送了约 3 400 千克载荷，包括研究设备、乘员补给、硬件等。飞船于 18 日抵达国际空间站，与团结号节点舱对接。这是天鹅座飞船第 13 次国际空间站补给任务，也是第二阶段商业补给服务合同的第 2 次任务。

- 3 月 8 日，SpaceX 公司使用复用猎鹰 9 火箭成功发射了一艘复用货运龙飞船，完成了第 20 次 NASA 商业补给服务任务（CRS-20），并成功回收火箭一级，这也是该公司的第 50 次火箭回收。此次任务是第一代龙飞船的最后一次任务。该型飞船已执行近 10 年的国际空间站任务，共向国际空间站运送了约 45 吨货物。此后，第二阶段商业补给服务合同将由第二代龙飞船执行。

- 3 月 12 日，欧洲航天局（ESA）局长让·沃纳宣布，由于缺乏对存在问题的降落伞和关键电子设备进行测试与鉴定，ESA 与俄罗斯国家航天集团（RSA）联合研制的“罗莎琳德·富兰克林”火星漫游车无法完成，导致 ExoMars 2020 发射任务推迟至 2022 年底。原计划 ExoMars 2020 的火星漫游车的发射窗口在 7 月 25 日—8 月 13 日，并使其于 2021 年 3 月抵达火星。



- 3月17日报道，SpaceX公司宣布，将改进其下一代星际运输系统——超重-星船助推级的设计。此次的微调将超重助推级的长度由68米提高到约70米。超重助推器采用37个猛禽发动机，在升空时可以产生超过90 000千牛的推力，是猎鹰9火箭的12倍。根据目前的设计，整个系统的高度将达到惊人的120米，质量超过5 000吨。因此，超重-星船一旦投入使用，就会成为有史以来最高、最重、运力最强的运输系统。

- 3月18日，SpaceX的猎鹰9火箭将第六批星链卫星送入太空。尽管火箭回收失败，但星链卫星被成功送入轨道。这枚猎鹰9火箭之前已经使用过四次，这是第五次执行任务，创下了火箭重复利用的新纪录。

- 4月2日，NASA发布《NASA月球持续探索和开发计划》，描绘了围绕“阿尔忒弥斯”计划展开的探月思路，提出要在月球南极建一座“大本营”，进行长期月球开发。

- 4月6日，NASA发布了一份由独立评审小组（IRT）针对国际空间站美国国家实验室管理问题的报告，对NASA以及该实验室的管理方——空间科学促进中心（CASIS）提出严厉批评。IRT在评审报告中针对国际空间站的管理问题给出了数项建议，其中包括对CASIS董事会成员及其作用的调整以及由CASIS设立一个用户咨询委员会。NASA局长吉姆·布里登斯廷在随后的一项声明中表示，该局应进行重大整改，以确保美国民众能从国际空间站的投资中获得最大利益。

- 4月6日，美国总统特朗普签署《鼓励国际支持开采与利用太空资源》行政令，明确提出美国有权开采与利用任何太空资源，美国不承认外层太空是国际公域，也不承认《月球协定》，这将可能引发新一轮月球开发国际竞赛。

- 4月9日，俄罗斯联盟2火箭搭载联盟MS-16飞船成功从拜科努尔发射场发射，箭船分离后约6小时与国际空间站对接。本次出征的航天员包括俄罗斯航天员阿那托利·伊万尼申（队长）、伊万·瓦格涅尔和美国航天员克里斯多夫·卡西迪。该发射任务是俄罗斯首次采用联盟2-1a火箭发射载人飞船，此前，联盟系列载人飞船发射任务均由联盟-FG火箭执行。

- 4月25日，哈勃空间望远镜迎来了它在太空中的第30个年头。这30



2020 世界载人航天发展报告

年是哈勃不断克服困难和挑战，不断进行修复、升级和创新的过程。多年来，它不仅进行过维修，而且还不断升级，使其成为当今最具发现能力的设备。这表明，维护（燃料加注、维修和升级）航天器有助于增强航天飞行的可持续性、承受性和弹性。

- 4月25日，俄罗斯在拜科努尔航天发射场利用联盟2运载火箭成功发射进步MS-14货运飞船。飞船采用两圈超短程飞行模式，经过3个多小时飞行后，成功与国际空间站对接。此次发射进步MS-14货运飞船载有超过2500千克物资补给和科研设备。进步MS-14飞船计划在轨驻留210天，于11月与国际空间站分离。此次任务为联盟2运载火箭的第35次轨道发射任务，进步系列飞船的第166次任务，也是进步MS飞船的第14次发射任务。

- 5月5日，美国联邦航空局商业航天运输办公室正式成立了航天港办公室，并签发运营许可证，为不断增加的商业航天港提供有效保障。

- 5月12日，NASA发布声明，为确保国际空间站上始终有美国航天员，保障其安全稳定运行。NASA与俄方签订合同，额外增购联盟MS-17载人飞船上的一个座位来运送美国航天员。合同值约为9000万美元，包括飞船上的座位、培训和发射前及着陆后的相关服务等。为补偿俄方临时调整乘员组，NASA同意在未来两年半的商业补给服务中为俄方提供约800千克的货物补给。

- 5月13日，NASA顾问委员会载人探测与运营小组召开为期2天的会议，对NASA实现2024年载人重返月球的目标提出质疑，并对目前的研制思路感到担忧。NASA接下来对2024年载人重返月球的“阿尔忒弥斯”计划进行调整和完善，包括将首批2个“门户”平台组件一同发射以及针对首次载人猎户座飞船飞行任务增加1次演示验证任务。

- 5月15日，NASA公布月球探索国际协议的基本原则——《阿尔忒弥斯协定》。该协定以美国的“阿尔忒弥斯”载人登月计划为名，主要包括人类如何在月球上行动、如何从月球表面开采资源、如何建立“安全区”等基本原则。《阿尔忒弥斯协定》提出一些框架性的建议，主要包括8条内容：互操作性、紧急援助、空间物体的登记、科学数据的发布、保护遗产、太空资源、避免活动的相互冲突、轨道碎片和航天器处置。



- 5月21日，JAXA从种子岛航天中心大型火箭发射场利用H-2B火箭成功发射H-2轨道转移飞行器-9（HTV-9），执行日本第9次、也是该型飞船的最后一次国际空间站补给任务。飞船于25日与国际空间站对接。此次任务中，HTV-9飞船向国际空间站运送物资补给、科研仪器共计6.2吨。

- 5月31日，SpaceX公司研制的载人龙飞船（命名为奋进号）成功发射升空，实施美国本土的首次商业载人试验飞行任务。飞行约19个小时后，飞船与国际空间站对接，NASA两名航天员道格·赫尔利和鲍勃·本肯进入国际空间站。这是自2011年NASA航天飞机退役以来，首次在美国本土进行的载人航天发射任务。

- 6月11日，NASA召集多国航天部门举行视频会议，研究讨论了载人探月、机器人探月和深空探测计划，会议大部分时间都是NASA阐述“阿尔忒弥斯”探月计划及其准备情况，包括其他合作国家参与的月球轨道平台建设的商业前景。俄罗斯代表阐述了俄月球探索计划以及对俄罗斯参与的月球“门户”项目的可能性做了评估。除了参加国际空间站项目的合作国家外，此次会议还邀请了阿联酋、韩国、印度和澳大利亚等国家的航天部门负责人参加。

- 6月27日，NASA航天员克里斯托弗·卡西迪和罗伯特·本肯完成一次长达6小时的出舱活动，执行国际空间站电源系统升级任务。在卡西迪出舱时，其舱外服出现问题，左腕上的小镜子突然脱落，并在真空环境下飘走。

- 6月29日，日本内阁府宇宙开发战略本部召开会议，对日本未来10年内的太空政策，即日本太空基本计划进行修订。日本将继续参与美国主导的月球“门户”空间站建设，为日本航天员争取登月的机会；强化卫星运用，并争取在2030年左右实现日本约1.2万亿日元（约合111亿美元）太空产业规模的倍增；加强与同盟国合作，强化支持太空活动的日本航天产业和科技基础，实现“成为自立的太空利用大国”目标等。

- 7月3日，国际空间站进行了一次计划外变轨操作。为避免撞击太空碎片，莫斯科地面飞行控制中心利用停靠在国际空间站上的进步MS-14货运飞船，对空间站实施变轨操作。飞船发动机工作约100秒，使空间站轨道高度按预先设定提升900米。



2020 世界载人航天发展报告

● 7月9日，NASA 公布了涉及月球和火星探测任务和行星保护工作的两项新指令——“NASA 暂行指令（NID）”，两项法令适用于 NASA 的任务、与他国合作的联合任务和商业航天活动。第一项新指令修改了月球的行星保护分类，要求对探测器上的所有生物材料进行归档，月球绝大部分区域归入第一类，从而不做任何行星保护方面的要求。极区和“阿波罗”登月遗迹归为第二类，以防遭到前向生物污染。第二项新指令针对未来载人探索火星任务，对火星的行星保护严格限制地面污染水平。

● 7月10日，日本文部科学省萩生田光一大臣与 NASA 局长布里登斯廷通过视频会议签署《文部科学省与美国国家航空航天局关于月球探测的共同宣言》。此共同宣言是将日本方面负责的任务具体化，包括日本将负责参与月球“门户”居住舱的建造、“门户”的物资补给、月面数据共享和研制月面探测用载人月球车等。此外，双方还对未来日本航天员将有机会参与“门户”和载人月面探测活动达成共识。

● 7月16日，NASA 航天员克里斯托弗·卡迪西和罗伯特·本肯完成 1 次出舱活动（EVA），大约持续 7 小时。目前，空间站右舷 6 号桁架段 3B 电力通道处的电力系统有 6 块镍氢电池已经老化，卡迪西和本肯取下其中 5 块，再安装 3 块锂离子电池和配套硬件。7月21日，两名航天员再次执行 EVA，取下最后一块镍氢电池。至此，空间站 8 条电力通道的电池升级改造工作全部完成，该项升级工作共进行 12 次 EVA，历时 3 年半。

● 7月20日，由阿联酋研制的希望号火星探测器在日本种子岛搭载日本的 H-2A 运载火箭成功发射升空。这是阿联酋首次火星探测任务，探测器于 2021 年 2 月抵达火星，运行时间为一个火星年。希望号任务的目标是探测火星大气的详细信息，它将以独特轨道绕火星运行，使探测器从另一个角度了解火星稀薄的由二氧化碳组成的大气层。

● 7月23日，俄罗斯进步 MS-15 号货运飞船搭乘联盟 2-1a 运载火箭在拜科努尔航天发射场成功升空，飞船将采用绕地球飞行 2 圈的超快模式与国际空间站俄罗斯码头号节点舱交会对接。飞船从发射到对接，用时 3 小时 21 分，这是进步号飞船第 5 次采用超快模式与国际空间站完成对接。

● 7月23日，美国国家太空委员会发布《深空探索和开发的新时代》文



件，报告以美国现有太空探索相关政策特别是《国家太空战略》和《太空政策指令-1》（SPD-1）为基础，提出美国深空探索的新愿景、5大任务以及政府应发挥的5种职能作用。同时，强调太空探索 and 开发不仅是 NASA 的主要工作，还需要美国国防部、国务院等其他政府机构以及国际和商业伙伴的合作。

- 7月30日，NASA 毅力号火星探测器于卡纳拉尔角航天发射场发射升空，开启了它前往火星寻找古生命迹象、采集样本、为未来载人登火星铺平道路的任务之旅。它将于2021年2月18日在火星的耶泽洛陨石坑着陆。毅力号的火星之旅将完成许多试验，其中包括舱外航天服材料的测试。

- 7月30日，俄罗斯能源火箭与航天集团公司表示，国际空间站俄罗斯舱段已开通卫星宽带网络，彻底摆脱了对美国通信设备的依赖。此前，国际空间站俄罗斯航天员一直都是在飞经俄罗斯领土上空时才能和地面进行通信，其他时间，如果确有必要，则需要使用美国舱段的通信设备进行联系。

- 8月3日，SpaceX 公司的奋进号载人龙飞船搭载2名航天员安全返回地球，溅落佛罗里达州以西的墨西哥湾。这是载人龙飞船首次载人再入飞行，也是1975年阿波罗-联盟飞行任务后，美国时隔45年再次在海上接回航天员，标志着载人龙飞船载人飞行试验正式完成，SpaceX 公司后续将为 NASA 提供正式的商业乘员运输服务。奋进号载人龙飞船于2020年5月31日发射入轨，飞行19小时后将2名航天员送至国际空间站。

- 8月28日，国际空间探索协调小组（ISECG）发布最新版“全球探索路线图”，提出了“载人和无人太空探索的共同国际愿景”。该思路与 NASA 的“阿尔忒弥斯”计划大致对应，呼应了2024年重返月球的计划。

- 8月20日，NASA 和俄罗斯国家航天集团同时宣布，国际空间站存在气体泄漏，但空间站空气泄漏率仍在允许范围内，暂时不会对航天员和空间站造成威胁。8月至10月，美、俄驻站航天员完成了两次搜索任务，最终确定了漏点。

- 9月4日，美白宫方面发布一项新的航天政策指令，意在提升航天系统的网络安全。《5号航天政策指令》（SPD-5）概述了为保护航天系统免遭黑客攻击和其他网络威胁的一整套最佳做法，强调加强政府机构和企业的协作。SPD-5 是与卫星和相关系统的网络安全领域的首个综合性政府政策。



2020 世界载人航天发展报告

- 9月16日，NASA称，载人探索与运行任务部重组工作已经完成，重组是为了解决部门间管理问题，重组后的载人探索与运行任务部新增加一个部门——系统工程与集成部，确保了部门间各项工作的高效运行。此外，重新定位了各部门的职责和使命。

- 9月22日，NASA公布“阿尔忒弥斯”计划的一些细节，包括最新制定的阶段1计划——在2024年将第一位女航天员和下一位男航天员送上月球，阶段1计划中，NASA着重补充了“阿尔忒弥斯-2”任务中实施的一项新测试，即绕月任务演示。2024年，“阿尔忒弥斯-3”任务将实现人类重返月球，航天员将首次从月球南极着陆，但目前还不确定“阿尔忒弥斯-3”“阿尔忒弥斯-4”和后续任务是否将利用“门户”与猎户座飞船。

- 9月25日，NASA局长布里登斯廷与意大利总理府负责太空事务的副秘书长弗拉卡罗签署合作意向书，意大利成为参与美国“阿尔忒弥斯”计划合作的又一个国家，计划投资超过10亿欧元（约12亿美元）。除意大利外，加拿大、日本、澳大利亚也同美国签署了“阿尔忒弥斯”合作协议。

- 10月3日，诺斯罗普-格鲁曼公司利用安塔瑞斯-230+运载火箭从沃罗普斯发射场成功发射天鹅座货运飞船，为国际空间站运送了约3519千克载荷，包括研究设备、乘员补给、舱外活动装备和计算机设备等。飞船飞行约2天半后成功与国际空间站对接。根据计划，天鹅座飞船将在国际空间站停泊约2个半月，于2020年12月中旬与空间站分离；随后，美国还将在飞船上单独开展航天器燃烧安全实验-5。

- 10月6日，俄罗斯国家航天集团称，俄联邦生物学署制定了俄罗斯至2030年的航天医学发展战略。在该战略框架下，已经制定了由17项科研措施组成的清单，旨在解决科学研究工作中未来尚待解决的课题：在基因、分子-细胞学水平上研究人体和动物生理学，在零重力下研究病理过程的特殊性。

- 10月13日，蓝源公司新谢帕德亚轨道飞行器从西德克萨斯州试验场起飞，并按设计到达105千米，助推器在起飞7.5分钟后完成有动力着陆，乘员舱在大约3分钟后依靠降落伞成功着陆。此次任务时长10分9秒，期间飞行器最大上升速度为3592千米/小时。试验代号NS-13，是蓝源公司第



13次也是2020年首次发射新谢帕德亚轨道飞行器。

- 10月14日，俄罗斯从拜科努尔航天发射场利用联盟2-1a运载火箭成功将联盟MS-17载人飞船发射进入预定轨道。飞船搭载3名航天员，分别是俄罗斯航天员谢尔盖·雷日科夫、谢尔盖·库德-斯维奇科夫和美国航天员凯瑟琳·鲁宾。发射后仅用时3小时3分飞船就成功与国际空间站对接，创造联盟MS飞船与空间站的最短交会对接时间纪录。

- 10月21日，国际空间站俄罗斯舱段星辰号舱的电子制氧系统7天内再次出现故障，这是继14日、19日之后第三次出现故障，前两次很快恢复了工作。航天员拆卸了该系统并检查其故障部件，俄罗斯称该故障并非设计上的缺陷。

- 10月21日，俄罗斯国家采购网公布，俄罗斯计划在2020—2021年期间拨款14.7亿卢布用于叶尼塞超重型探月运载火箭的技术设计项目，其中2020年拨款5.374亿卢布，2021年拨款9.3亿卢布。

- 11月10日，美国会参议院公布了一系列2021财年支出法案，拟为NASA拨款234.95亿美元，比众议院的支出法案多出8.66亿美元，但要比白宫2021财年预算申请额减少17.5亿美元。其中为载人着陆系统（HLS）项目拨款10亿美元，虽然高于众议院支出法案的6亿美元，但远远低于NASA的32亿美元申请额。

- 11月13日，ESA与瑞士清澈太空公司签署了首项空间碎片清除任务合同，合同总值9600万欧元。这是全球首项非试验性质的空间碎片清除任务，需要捕获2013年维加火箭发射时脱落的载荷适配器，该适配器重约112千克，处于801×664千米的地球轨道。

- 11月16日，SpaceX公司的载人龙飞船由猎鹰9火箭从卡纳维拉尔角发射升空，执行NASA商业载人运输计划下的首次正式飞行任务，飞船搭载4名航天员，其中1名是日本航天员。这4名航天员的到来，使空间站上长期考察团标准人数由6人升为7人。飞船约1天后与国际空间站顺利对接，预计6个月后返回。

- 11月18日，俄罗斯航天员谢尔盖·雷日科夫和谢尔盖·库奇-斯维尔奇科夫顺利完成了出舱活动，此次出舱主要任务是为科学号多功能空间实验



2020 世界载人航天发展报告

舱的对接做准备工作，也是为 2021 年 4 月科学号舱的发射有关的首次舱外活动。航天员身穿海鹰 MKS 航天服在舱外持续工作了 6 小时 47 分钟。俄罗斯航天员上一次出舱活动还是在 2019 年的 5 月 29 日。

- 11 月 20 日，德国航天中心与 JAXA 签署一项协议，就规划一项低成本的小行星探测任务结成伙伴，这项被称为“命运”的小行星探测任务拟于 2024 年发射，前往 3 200 法厄同小行星。

- 12 月 6 日，JAXA 的隼鸟 2 探测器携带从龙宫小行星采集的样本成功返回地球，着陆在澳大利亚伍莫拉靶场内。隼鸟 2 于 2014 年 12 月由 H-2A 火箭发射升空，2018 年抵达小行星，任务期间投放了两辆漫游车和一台着陆器，开展了两次“一触即走”的着陆采样行动。2019 年 11 月，探测器开始返回地面。

- 12 月 7 日，SpaceX 公司猎鹰 9 火箭在卡纳维拉尔角肯尼迪航天中心成功升空，执行 NASA “商业补给服务”项目下国际空间站货运任务，任务代号龙 CRS-21。本次任务首次采用了 SpaceX 公司货运龙飞船，携带了约 3 吨重的物资补给和科研仪器。

- 12 月 7 日，NASA 发布“阿尔忒弥斯”任务报告，报告由 9 月新组建的“阿尔忒弥斯 3 科学定义团队”编制，列出了该任务的 7 大科学目标，包括行星、空间科学以及研究航天员面临风险等科学目标，同时也指出了科学目标同任务技术能力之间存在的矛盾。

- 12 月 9 日，特朗普政府发布新版《国家航天政策》，明确了美国在民用空间探测、商业增长和国家安全方面的目标，将美国天军视为负责保卫美国在太空利益的主要机构。

- 12 月 9 日，NASA 局长布莱登斯坦宣布，从现有航天员队伍中选拔出 18 名航天员组建为“阿尔忒弥斯团队”，这些航天员将被安排在未来的“阿尔忒弥斯”任务中，首先将执行“猎户座”飞船绕月飞行的“阿尔忒弥斯-2”任务。

- 12 月 10 日，SpaceX 公司对其星船运载器一枚原型试验箭进行了首次高空试飞，火箭成功起飞，最大试飞高度 12.5 千米，但几分钟后在尝试着陆时发生爆炸。随后 SpaceX 公司宣布试飞成功，只是在着陆过程中燃料高位



贮箱压力过低，导致接地速度过高，从而发生意外解体。

- 12月17日，ESA选定新局长约瑟夫·阿什巴赫接替现任局长让·沃纳，上任时间是2021年6月。

- 12月21日，美国国会公布了2021财年综合开支法案，将为NASA拨款232.71亿美元，比NASA 2020财年实得拨款高了6.42亿美元，比NASA申请的252.46亿美元少了近20亿美元。

- 12月21日，美国太空制造公司宣布，该公司采用3D打印技术在国际空间站上制造出首个在轨制造的陶瓷部件——整体式涡轮叶盘。

- 12月30日，美国白宫发布《国家行星保护战略》，该战略由国家航天委员会和科技政策办公室牵头制定，包括三大目标：一是制定一项“基于风险评估和科学的指针”减缓“正向污染”；二是寻求避免“反向污染”；三是寻求在行星保护问题上吸纳私营部门的观点。

美国 2020 版《国家航天政策》

12月9日，美国白宫发布新版《国家航天政策》，重点概述了美国航天活动应遵循的原则，美国在民用航天探索、商业增长和国家安全方面的目标，以及各个部门的航天活动指南等。全文由6个章节组成。

1. 原则

确保航天活动的安全、稳定和长期可持续性是所有国家的共同利益。各国不得通过主权要求、使用或占领等方法，将包括月球与其他天体在内的外层空间据为己有。美国将根据法律，开采和利用航天资源，并利用太空进行国家安全活动，包括行使自卫权。所有国家都有权为和平目的和全人类利益探索和利用太空，有权在不受干扰的情况下进行太空行动。在太空领域中，美国将寻求慑止、抵抗和击败对美国及其盟国的国家利益具有敌意的威胁。

2. 目标

- 促进和激励私营企业发展，为美国太空商品和服务创造新市场，加强和维护美国作为国际太空商业全球伙伴的地位；
- 通过开发和实施外交、经济和安全能力与战略，鼓励和维护各国负责任、和平地使用太空的权利；
- 领导、鼓励和扩大在互利太空活动方面的国际合作；促进以和平为目的的太空探索和利用；保护美国、盟国及伙伴国家的利益；增加获取太空信息和服务的机会；



- 与工业界和国际伙伴合作，通过发展和促进负责任的行为，为太空活动创造安全、稳定、有保障、可持续的环境；改进收集和分享太空物体信息的做法；保护重要的太空系统和配套基础设施，特别关注网络安全和供应链；制定减少轨道碎片的措施；

- 通过开发部署装备和非装备能力，并连续性演练作战实践，提高商用、民用、科学和国家安全航天器及配套基础设施的国家关键保障功能；

- 通过在月球上建立月球基地，将人类经济活动扩展到太空，并与私营企业和国际伙伴合作，开发基础设施和服务，实现科学的探索、空间资源利用和载人火星任务；

- 通过培养、发展太空使能科学和经济能力，提高全人类生活质量；

- 保持和扩大美国在发展创新型太空技术、服务和作战方面的领导地位。

3. 各部门指南

美国在三个部门开展太空活动：商业、民用和国家安全。目前，太空领域已发展成为作战域。美国必须调整国家安全组织、政策、战略、原则、安全分类框架和能力，阻止敌对行动，通过以下方式挫败侵略，保护美国在太空的利益：

- 强大的太空域感知能力，能够描述和确定潜在威胁的行为；

- 向竞争对手传达美国认为不可取或不负责任的太空活动，同时宣传、展示和传达负责任的行为准则；

- 为捍卫太空中至关重要的国家利益而采取的有保证、可靠的应对措施；

- 具有弹性的太空任务；

- 同步的外交、信息、军事和经济战略。

3.1 对于太空探索的相关要求

美国将与商业和国际伙伴一起实现人类在整个太阳系中的扩展，并带回新的知识和机会。从近地轨道以外的任务开始，美国将带领人类返回月球进行长期探索和利用，随后进行载人火星和其他目的地的任务。



2020 世界载人航天发展报告

- 2024 年实现载人重返月球，2028 年在月球上实现长期存在，随后实现载人登陆火星；

- 继续与国际伙伴合作，以科学、技术、商业、外交和教育为目的，推进国际空间站的运行，同时开发独立的商业平台，以维持美国在近地轨道上的持续存在和利用；

- 发展伙伴关系，以促进近地轨道及以远的新经济活动，使 NASA 和其他客户能够以较低的成本购买服务和能力；

- 与适当的国际和商业伙伴协商，支持包括人类在太空中存在的活动；从国际空间站过渡到商业平台和服务，保持人类在地球轨道上的持续存在；并继续支持人类太空探索的未来目标；

- 继续作为民用航天部门的发射用户，最大程度地利用商业航天能力和服务；

- 继续与商业航天部门建立伙伴关系，以确保安全、可靠和低成本地将人员与货物运输到低地球、顺月轨道及月球表面；

- 与工业界、学术界和国际伙伴合作，领导太空探索技术的开发工作，以提高未来载人和机器人太空探索任务的能力，同时降低任务成本；

- 与国际和商业伙伴在太阳系中保持持续的机器人存在，为将来的载人任务做准备；进行科学调查；绘制和表征水、矿产和元素资源；并展示新技术；

- 开展太空科学活动以观察、研究和分析太阳、太空天气、太阳系与宇宙，增进对宇宙的了解，增长科学认识，了解可能支持生命起源的条件以及寻找类地球行星；

- 与其他机构、商业和国际伙伴合作，具备探测、跟踪、分类和表征近地物体的能力，以预警任何可能撞击地球的小行星，或确定潜在资源丰富的行星；

- 与其他机构和国际伙伴合作，为在地球和太空中的行星防御行动制定方案，以减轻近地物体撞击或轨迹的潜在影响。



3.2 太空安全

太空领域是美国优先考虑的情报和军事行动领域。美情报部门和国防部利用太空能力为国家提供战略、作战和战术情报以及决定性的军事优势。国防部长和国家情报局长应与其他相关机构、联邦实验室的负责人协商，在适当情况下与美国工业界合作，应：

- 开发、采办和运行太空系统以及支持信息系统和网络，以实现国防和情报作战；
- 在竞争和武装冲突期间，获取弹性太空能力和服务，提供国防和情报行动；
- 应用先进技术、能力和概念，预测并迅速应对环境的变化，提高情报和数据的及时性与质量，以支持作战行动；
- 为实现有效威慑和防御，确定和描述当前和未来美国太空任务所面临的威胁；
- 开发有弹性、成本效益高的体系结构，并加快采办和部署太空能力，以提高太空任务的弹性。
- 制订、实施和演习确保国家安全太空使能任务所需的计划、程序、技术和能力；
- 通过整合和同步作战指挥与控制能力以及促进情报部门和国防部之间无缝衔接的活动，保护和保卫美国国家安全太空资产；
- 促进制定负责任的国家安全空间活动行为准则，以保护美国、盟国和合作伙伴的太空利益；
- 确保太空能力弹性，太空任务与其计划相匹配，并考虑这些系统在应对或减轻威胁方面的价值及系统损失或降级的后果，以及是否有执行任务的其他手段；
- 加强对颠覆性和新兴商业太空能力的重视，并就这些能力对国家安全的影响进行评估；
- 将网络安全集成至太空行动和能力中，以保持对太空系统的积极控制；



2020 世界载人航天发展报告

- 与相关机构、政府和商业实体合作，提高、发展、整合、和演示验证太空域感知能力，以预测、探测、预警、表征对美国太空系统构成威胁的人为和自然活动；
- 向商务部和其他机构提供必要的太空态势感知信息，以支持国家安全，民用和人类太空飞行活动，防御外来威胁；
- 与积极参与太空安全和情报行动的盟国和伙伴合作，促进建立交流太空信息的机制；
- 与商务部长、能源部长、美国国家航空航天局局长和其他相关机构负责人合作，定期审查美国太空工业基础的状况和竞争力，确定国内太空工业是否能够满足技术和生产要求。

美国太空政策指令-6

——太空核动力与推进国家战略

美国白宫于12月16日发布了《太空政策指令-6》(SPD-6)——《太空核动力与推进国家战略》，旨在推动美国太空核动力和推进技术的快速发展。该战略提出应在适当的时候开发和使用太空核动力与推进系统，以实现美国的科学、探索、国家安全和商业目标。该战略包括政策、目标、原则、职责、路线图、实施、一般规定等7个章节，约12页。

1. 太空核动力与推进的内涵与意义

太空核动力与推进(SNPP)系统包括可用于航天器、漫游车以及其他表面设施的动力或推进的放射性同位素动力系统(RPS)和裂变反应堆。SNPP系统可确保上述系统在太阳能和化学能不足的环境下运行。与其他动力方式相比，SNPP能以更低的质量和更小的体积产生更多的能量，从而实现持久存在和运行。SNPP系统还可以缩短航天员和机器人航天器的飞行时间，从而减少在恶劣太空环境中的辐射暴露。具备安全、可靠和可持续地使用SNPP能力对于维持和提升美国在太空中的主导地位 and 战略领导地位至关重要。

2. 发展太空核动力与推进的四大目标

美国希望通过SNPP的开发和使用，不仅要实现一系列现有和未来的太空飞行任务，又能充分满足时间进度的要求，目标包括：

一是开发铀燃料处理能力，以生产出适用于月球和行星表面与航天器的



2020 世界载人航天发展报告

核电推进（NEP）和核热推进（NTP）所需的燃料。

二是演示月球表面的裂变动力系统。该系统的功率可达到 40 千瓦电（kWe）或更高，以支持持续的月球存在和火星探索。

三是建立技术基础和能力。包括通过确定和解决关键技术挑战，使 NTP 能够满足国防部和 NASA 未来的任务要求。

四是开发出更先进的放射性同位素动力系统，以提供更高的燃油效率，更高的比能量和更长的使用寿命，支持机器人与人类对月球的长期开发和火星的探索，并扩展对太阳系其他目的地的机器人探索。

3. 发展太空核动力与推进的 3 大原则

根据所适用的国内法律和国际条约，美国开发和使用 SNPP 系统时将遵循安全、可靠和可持续性 3 大原则。

- 安全。所有参与 SNPP 系统开发和使用的部门和机构均应采取适当措施，以确保在各自职责范围内安全开发、测试、启动、运行和处置 SNPP 系统。对于政府的 SNPP 计划，项目启动机构对安全负有主要责任；对于涉及多个机构的计划，应指定每个阶段对安全负主要责任的牵头机构。

- 可靠。参与 SNPP 系统开发和使用的所有机构均应采取适当措施，以符合核不扩散的原则，保护核材料、放射材料以及敏感信息。在 SNPP 系统中使用高浓铀（HEU）应该仅限于该任务，不能用于其他任务。在选择 HEU、低浓铀（LEU）或裂变反应堆系统之前，主管机构应进行彻底的技术审查，以评估替代核燃料的解决方案的可行性，并向国家安全委员会、国家太空委员会、科学技术政策办公室以及管理与预算办公室提供简报，以提供理由说明为何使用 SNPP 系统。

- 可持续性。所有参与 SNPP 系统开发和使用的机构均应采取适当措施，使其适合美国航天能力长期发展并确保 SNPP 的领导地位，如充分与学术机构及商业机构开展合作等。

4. 发展太空核动力与推进的路线图

（1）21 世纪 20 年代中期。具备铀燃料处理能力，可生产出用于月球和行星表面以及空间动力的核电推进（NEP）和核热推进（NTP）所需要的



燃料。

(2) 21 世纪 20 年代中期至后期，演示月球表面的裂变动力系统，功率可扩展至 40 千瓦电或更高，以支持持续月球开发和火星探测。NASA 应在 2027 年之前启动裂变表面动力项目，用于月球表面演示，并可用于火星探测。

(3) 到 21 世纪 20 年代后期，建立技术基础和能力（包括通过识别和解决关键技术挑战），使核热推进能够满足国防部和 NASA 未来的任务需求。

(4) 到 2030 年，开发先进的放射性同位素动力系统。与现有系统相比，可提供更好的燃料。

美国国家航空航天局月球持续探索与开发计划

1. 概述

月球是通往太阳系的大门，作为地球最近的行星邻居，月球极有可能成为新的科学进步和经济增长的源泉。它也是测试深空系统和操作的最佳场所，为人类第一次到另一个星球——火星的任务做准备。在未来的十年里，“阿尔忒弥斯”计划将为月球表面长期存在奠定基础，并在开始更远的火星之旅之前，利用月球验证深空系统和操作。

在未来几十年以及几代人的时间里，人类的存在将更加广泛地利用和开发月球资源，包括水和矿物资源。随着月球奥秘的揭开，人们对科学的兴趣不断增加。除了通过月球地质和化学深化对地球和太阳系形成的科学认识，对月球的探索还将促进关于宇宙的突破性科学发现，包括可在月球远端无与伦比的有利位置进行射电天文学研究。就像在太空和现在的近地轨道，美国国家航空航天局在科学和探索领域发挥了引领作用，并促进了经济发展。“阿尔忒弥斯”计划将从 2021 年美国首次向月球进行商业发射开始，为月球表面提供商业机会。

月球不仅仅是一个物理目的地。“阿尔忒弥斯”的核心重点是，与国际伙伴和私营企业一起，将国家地缘战略和经济领域拓展至月球。美国将领导制定明确的政策原则，支持民用空间探索，并首先强调“阿尔忒弥斯”计划，在商业伙伴、美国政府和国际伙伴之间建立信心。具体而言，美国将在《外层空间条约》的支持下，为太空资源的开采和利用建立一个可预测的



安全程序。

人类首次前往火星的任务将标志着人类文明的变革时刻。建立持久的月球存在，并向人类首次火星任务迈出第一步，将是人类历史上最伟大的工程壮举和探索与发现之旅。这些任务将利用国家无与伦比的科学能力、充满活力的经济和强大的工业基础，推动技术的发展与创新。这些任务将激励一代又一代的科学、技术、工程与数学（STEM）和无数其他学科的专业人才，同时为国内政府、工业界和学术界的合作伙伴创造机会。

最重要的是，“从月球到火星”计划的成功，将确保美国继续走在探索和发现的前沿。美国仍然是唯一成功实现人类登月和航天器登陆火星表面的国家。鉴于其他国家持续扩大参与并稳步增加支出，美国应继续领导下一阶段的人类追求，在最终疆域创造一个自由无尽的未来。

2. “阿尔忒弥斯”时代

在未来十年里，我们将再次看到人类在月球上行走——这是“阿尔忒弥斯”时代。“阿尔忒弥斯”——阿波罗的孪生妹妹，将在月球上和月球周围建立关键的基础设施，在未来几代人的生活中发挥作用。

美国人将在 2024 年重返月球。2024 年登陆月球后，美国将在月球南极建立一个持续的战略存在，称为“阿尔忒弥斯营地”。未来十年，我们在“阿尔忒弥斯营地”的活动将为长期的月球经济和科学活动，以及 21 世纪 30 年代的首次人类火星任务铺平道路。

月球是地球过去和未来的重要组成部分。从 2021 年开始，一系列机器人先驱和技术验证将在月球上运行。尽管 50 多年前美国人就实现载人登月，但航天员只是短暂地在几个地点留下足迹，在月球表面总共停留了 16 天。这些任务都在月球的赤道地区进行，相当于在非洲大小的土地上飞行不足 100 千米（约 62 英里）。

下一次月球探索将会有根本的不同。美国最初将于 2023 年对月球附近进行探索，航天员 2024 年在月球上着陆。对大多数人来说这将是首次有机会见证人类登陆月球。美国不会就此止步——这将是发现与探索新时代的新篇章。



2020 世界载人航天发展报告

3. 领域探索战略

“阿尔忒弥斯”是美国国家航空航天局未来十年探索和载人航天计划的核心。“阿尔忒弥斯”以国际空间站正在进行的载人航天任务为基础，为未来的载人航天计划，包括首次载人火星任务铺平道路。美国国家航空航天局的总体零级探索目标包括三个主要领域——近地轨道、月球和火星。

(1) 零级探索目标

- 将美国近地轨道载人航天飞行转变为商业运行，为美国国家航空航天局及其合作伙伴提供支持。利用国际空间站和新的商业设施作为探索技术的试验台，促进新兴商业应用。

- 通过强有力的商业和国际合作伙伴关系，推进机器人对月球的长期探索。

- 推进美国航天员登陆月球并安全返回。

- 扩大美国在月球的载人航天行动，为月球表面活动提供持续支持，对火星前沿体系结构组件进行验证。

- 推进机器人登陆，继续保持美国在火星的领导地位，为人类探索做准备。

- 参与前进的每一步，激励美国和世界。

(2) 机器人的任务

虽然轨道任务提供了关于月球表面及其潜在资源的广泛信息，但机器人月球表面探测车对于验证这些观测结果、为人类居住和利用月球上的资源做准备至关重要。着陆器和月球车提供了优秀的平台进行技术验证，这些技术将大幅提升月球表面任务能力，并可应用于从月球到火星计划以外的任务，如地效机器人采矿系统和下一代电力存储系统。多个着陆器可拓展对整个月球及其资源的探索。月球车可携带各种各样的仪器，对火星表面进行更广泛的探索，包括原位资源利用试验，这些仪器将产生关于资源（例如氧气和水）可用性的详细信息。

4. “阿尔忒弥斯”早期任务

美国重返月球的基础是美国国家航空航天局的猎户座飞船和航天发



射系统。猎户座飞船是为绕月深空任务而设计的，最多可容纳 4 名航天员，而航天发射系统是一种强大的重型运载火箭，可将大质量货物发射到月球环境中。除此之外，合同还规定了月球返回结构的两个最新组成部分：动力与推进装置（PPE）和居住与保障舱（HALO）。它们共同构成了“阿尔忒弥斯”绕月平台的月球空间站基础。在位于休斯敦约翰逊航天中心的美国国家航空航天局任务控制中心的帮助下，月球空间站的初期将为自主运行，以进行系统检查，并获取关于深空环境的关键科学数据。载人着陆系统可确保在月球空间站稳定实施月球探险时，猎户座飞船将运送第一批航天员到月球空间站。

“阿尔忒弥斯”计划从航天发射系统和猎户座飞船（“阿尔忒弥斯-1”任务）的无人飞行测试开始，然后是载人飞行测试（“阿尔忒弥斯-2”任务）。“阿尔忒弥斯-1”任务将无人驾驶的猎户座飞船发射到距离地球 28 万英里的地方。由地球上的任务控制人员收集数据，对两个航天器的性能进行评估。此次任务还将部署 13 个微型卫星，进行新的科学调查和新技术验证，将吸引比以往单一任务更多的大学和公司参与月球探索。

随着航天发射系统、猎户座飞船、“阿尔忒弥斯”首次载人飞行测试的展开，航天员将在 50 多年来首次返回月球附近。这将是新一代的“阿波罗 8 号时刻”。美国国家航空航天局计划在这次任务结束后对“阿尔忒弥斯-3”任务的每一个硬件、软件和操控组件进行测试，但尚不包括在月球表面进行实际着陆。

美国国家航空航天局自“阿尔忒弥斯-1”任务和“阿尔忒弥斯-2”任务以来将累计进行近 100 万英里的飞行验证，“阿尔忒弥斯-3”任务将继续对深空运输系统进行严格测试。“阿尔忒弥斯-3”任务于 2024 年将第一位女性和下一位男性送上月球时，将展示美国对全球太空领导的新水平。随着探月能力的重建，美国国家航空航天局和世界各国将专注于在月球表面建立持续存在，为月球长期发展和人类对火星的探索做准备。

在这些核心组件、后勤保障和航天发射系统/猎户座飞船飞行任务持续推进，以及载人着陆系统采购加紧实施的同时，美国国家航空航天局正与新的国际和行业伙伴合作，共同发展月球持续存在的其他核心组件——包括月球



2020 世界载人航天发展报告

地形车 (LTV)、月球移动居住或宜居移动平台、月球表面基础居住舱 (FSH)、电力系统、月球原位资源利用系统和经扩展的月球空间站居住能力。美国国家航空航天局将利用多年的辛勤工作和国家对所需系统的投资，结合本文件中提出的方法，实现重返月球，从而推进现有的和新的合作伙伴和能力持续发展，而所有这一切将催生人类第一个火星任务。

5. 2024 年之后的“阿尔忒弥斯”任务

“阿尔忒弥斯-3”任务之后，总体计划是在月球及其周围开展行动，帮助美国确定人类首次火星任务的时间和行动，同时还可配置和构建基础设施、系统和机器人任务，保持在月球表面的持续存在。为此，美国将在月球南极建立“阿尔忒弥斯营地”，如图 1 所示。

“阿尔忒弥斯营地”将是美国在月球前沿的第一个可持续立足点。美国最初将在月球停留一到两个月，更多地了解月球和宇宙；随后将继续开发新技术，促进国家工业发展，寻找有助于促进经济增长的新资源。总的来说，该营地将证明美国在太空领域的领导地位，并为人类首次登陆火星做好准备。

“阿尔忒弥斯营地”的三个主要任务组成部分是：可在营地周围运送航天员的月球地形车 (LTV)；可用于远离“阿尔忒弥斯营地”进行长期旅行的宜居移动平台；可供 4 名航天员在月球南极短暂停留的月球表面基础居住舱。再加上随着时间的推移而增加的配套基础设施，如通信、电力、辐射防护、着陆平台、废弃物处理和存储规划——这些要素构成了在月球上的持续能力，可在未来几十年再次访问和重建。

机动性是“阿尔忒弥斯营地”的重要组成部分。月球地形车 (LTV) 和宜居移动平台可促进对月球的长期探索与开发。除了庞大的规模之外，月球的地理环境也很复杂，资源也较为分散。月球和火星的探索与开发都需要强大的机动系统。宜居移动平台是一个特别重要的任务组件，因为对这颗红色星球进行探索需要使用类似型号的运输工具。

除了建立“阿尔忒弥斯营地”外，保持月球持续存在并向火星传送的另一个核心组件是在月球空间站的位置扩大居住地和相关支持系统。月球空间



站系统的演变包括了大容量的深空居住系统，有助于航天员在月球轨道上对往返火星的旅程进行测试。月球空间站还可以支持美国在月球表面模拟首个类似于火星的任务。在这项任务中，将有 4 名航天员前往月球空间站，并在该前哨站生活数月，模拟火星之旅的出站。接着 2 名人员走出空间站，利用宜居移动平台对月球表面进行探索，而另 2 名人员则留在空间站。然后，4 名航天员在月球空间站重聚，再停留数月，模拟返回地球的旅程，然后着陆回家。这些任务将是人类历史上持续时间最长的深空任务。这是对长期深空系统的准备工作，以及对首次人类火星任务人员分离的首次操作测试。

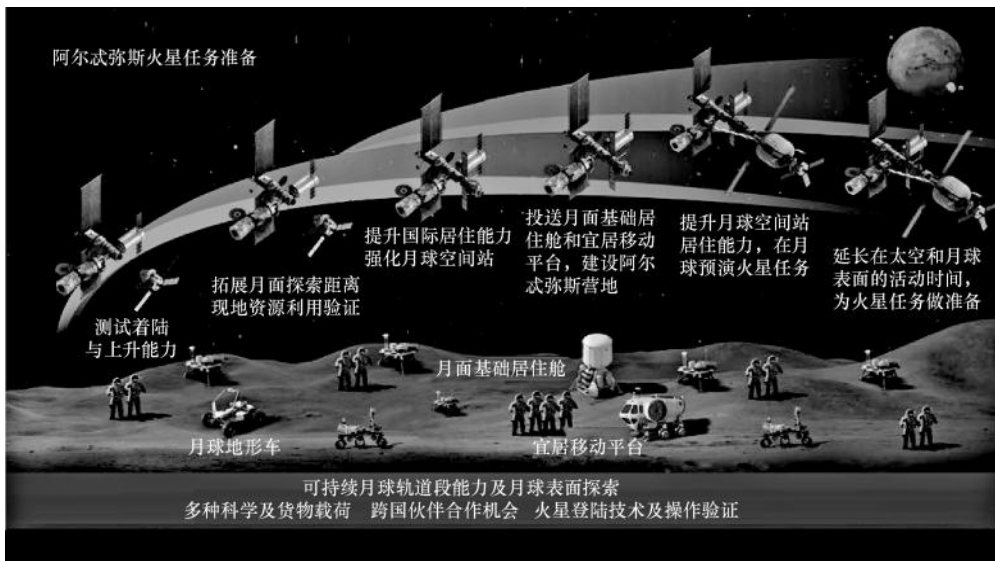


图 1 月球侦察轨道飞行器拍摄到的月球南极沙克尔顿环形山，外环大小与首都环城公路相当

按照目前设想的顺序，首先由商业化月球运载服务（CLPS）着陆器发送月球先驱机器人，包括极地挥发物探测车（VIPER），搜集月球表面真实地形数据，并为人类月球着陆点提供水和金属资源。随后，将月球地形车（LTV）投送到月球表面，以增强最初几项人类月球表面任务的机动能力，并扩展探测范围。月球空间站的第一个组件正在开发中，可支持未来可持续的人类登月任务。美国国家航空航天局预计国际合作伙伴将提供机械臂、国际居住地（I-Hab）与补给和通信模块（ESPRIT），为月球轨道上的月球空间站能力提



供补充。

宜居移动平台投送到月球表面后，可将探测范围扩大数十千米，在月球表面的任务持续时间可从 7 天延长到 30~45 天，使潜在的火星表面模拟任务成为可能。“阿尔忒弥斯营地”的其他关键设施也将进行投送，包括最多可容纳 4 名航天员的月球表面基础居住舱（FSH）、月球表面电力系统、原位资源利用（ISRU）验证和试点工厂。

6. 充满活力的地球-月球未来

人类完成首次登陆火星的任务，并不意味着登月任务的结束。为期两年的火星任务发射窗口每隔几年就会打开一次，美国将继续执行人类到月球表面的任务，进行系统测试和科学调查，为最佳发射窗口做准备，同时继续保持月球上的持续存在。

美国将继续对月球进行无限探索——利用商业化月球运载服务（CLPS）供应商提供的机器人投送、持续时间更长的人类任务，以及商业和国际合作伙伴关系，为美国国家航空航天局“阿尔忒弥斯营地”增添新的组件。月球地形车、宜居移动平台和月球表面基础居住舱将留在月球上，确保航天员可在月球表面一次生活数月。月球车和航天员在月球上的服务能力将被设计成自动运行，并与独立的机器人助手一起工作。

除了为首次火星任务测试系统外，“阿尔忒弥斯营地”的一个核心目的是验证新技术，随着时间的推移，这些新技术将提升太空探索的能力，降低月球运行成本。“阿尔忒弥斯营地”的航天员将在美国国家航空航天局月球表面创新计划所涵盖的 6 个优先领域内对一系列新技术进行广泛测试（例如：原位资源利用、月球表面电力、极端区域访问、挖掘和施工、月球尘埃消除以及极端环境操作等）。

航天员还将对先进机器人进行测试，包括未来仿生系统，该系统能够在月球上实现更自主的操作，并可作为航天员的机器人助手。随着时间的推移，“阿尔忒弥斯营地”可能还会配备一个可将科技载荷运送到月球各地的料斗，可由“阿尔忒弥斯营地”的航天员操作，取用当地原料生产的推进剂进行燃料补给。还可在“阿尔忒弥斯营地”远程放置和操作月球远端射电望远镜——



安装在第一个月球营地后院的射电望远镜。

在月球保持充满活力的持续存在，不仅需要美国国家航空航天局及其国际合作伙伴航天机构的最大努力，也需要整个美国政府和商业部门付出最大努力。基础设施的建立需要更多国际和商业伙伴的合作，为第一批国际和商业航天员登陆月球表面创造机会，为继续推进人类探索 and 开发开启新的大陆。美国国家航空航天局独特的领导力和能力将与创新和贡献相结合，促进国家和经济的发展。

7. 最初的人类火星任务

最初的探月任务将极大地启发火星行动概念。美国国家航空航天局正在为首次人类火星任务而开发的操作概念，将大大缩短旅行时间，在火星表面停留的时间也将缩短到 30~45 天左右。美国国家航空航天局将继续考虑的因素包括：飞行过程中航天员的健康风险，包括来自银河系的宇宙射线辐射和潜在的灾难性任务事件；火星表面任务操作的复杂性；还有任务系统的复杂性和成本，比如空间推进、重载荷着陆的能力，以及所需的地面系统。美国国家航空航天局的目标是尽快实现一项人类火星任务，同时仍要确保能够在首次任务中对火星表面进行广泛的探索，包括寻找火星生命。在把人类送上这段史诗般的旅程之前，月球是测试和验证这项任务的重要部分。美国国家航空航天局将在未来几个月公布更多关于如何在月球上为人类首次火星任务做准备的策略。

“阿尔忒弥斯”计划——美国月球开发项目概述

表 1 美国国家航空航天局各中心

序号	中心名称	所在地
1	兰利研究中心	弗吉尼亚州汉普顿
2	肯尼迪航天中心	佛罗里达州
3	马歇尔航天飞行中心	阿拉巴马州亨茨维尔
4	斯坦尼斯航天中心	密西西比州
5	麦考德装配厂	路易斯安那州新奥尔良
6	约翰逊航天中心	得克萨斯州休斯顿
7	白沙测试基地	新墨西哥州拉斯克鲁塞斯
8	阿姆斯特朗飞行研究中心	加利福尼亚州爱德华兹
9	喷气推进实验室	加利福尼亚州帕萨迪纳
10	艾姆斯研究中心	加利福尼亚州莫菲特菲尔德
11	梅溪工作站	俄亥俄州桑达斯基
12	格伦研究中心	俄亥俄州克利夫兰
13	凯瑟琳·约翰逊 4 号和 5 号基地	西弗吉尼亚州费尔蒙特
14	戈达德航天飞行中心	马里兰州格林贝尔特
15	瓦勃普斯飞行基地	弗吉尼亚州瓦勃普斯岛
16	航空航天局总部	华盛顿特区

艾姆斯研究中心

- 极地挥发物探测车 (VIPER)



- 猎户座飞船热保护系统
- 针对航天发射系统（SLS）和商业运载火箭的风洞测试和计算分析
- 人类自主系统
- 飞行模拟器

阿姆斯特朗飞行研究中心

- 猎户座飞船飞行测试系统集成
- 猎户座飞船中止测试助推器
- 进入、下降和着陆验证
- 月球着陆器技术的亚轨道飞行测试

格伦研究中心

- 月球空间站动力与推进组件
- 猎户座飞船欧洲服务舱管理和测试
- 月球表面和航天器动力（裂变、放射性同位素和太阳能）
- 认知和量子通信
- 低温流体管理
- 原位资源利用
- 太空环境模拟测试
- 梅溪工作站管理

戈达德航天飞行中心

- 月球侦察轨道飞行器
- 航天员科学操作训练
- 太阳物理学、太空气象、辐射、航天员与硬件支持
- 太空通信与导航
- 太空维修与组装
- 软件与航空电子设备
- 月球与火星基础、应用科学



2020 世界载人航天发展报告

- 沃勒普斯飞行设施管理

NASA 总部

- 机构利益相关者参与
- 董事会管理和整合
- 计划/项目制定
- 月球表面创新计划

喷气推进实验室

- 猎户座飞船系统工程与集成
- 猎户座飞船热保护系统和降落伞独立验证
- “毅力”号火星探测器：机器人行星取样、航天服材料弹性
- 月球空间站电动推力器开发
- 先进航天器环境监测
- 地形相关导航

约翰逊航天中心

- 猎户座飞船项目
- 月球空间站项目
- 月球空间站居住与保障舱
- 商业化月球运载服务
- 航天员办公室
- 任务控制中心
- 飞行操作和执行
- 人类健康和表现、医疗能力探索
- 舱外探索移动单位（xEMU）航天服开发及首次建造
- 月球地形车
- 精准着陆/危险规避
- 月壤样品管理



肯尼迪航天中心

- 探索地面系统
- 地面处理、发射、着陆和回收计划与实施
- 月球空间站后勤服务
- 发射控制中心
- 商业运载火箭服务与采购

兰利研究中心

- 猎户座飞船发射中止系统
- 猎户座飞船水冲击测试
- 导航多普勒激光雷达
- 战略、架构和系统工程
- “阿尔忒弥斯-1”阶段发射和猎户座飞船再入的科学校正飞行图像
- 辐射防护

马歇尔航天飞行中心

- 载人着陆系统项目
- 航天发射系统项目
- 航天发射系统核心阶段开发、建造、结构测试
- 航天发射系统核心阶段结构测试
- “阿尔忒弥斯-1”阶段二级载荷
- 运载火箭级间适配器（LVSA）和猎户座飞船级间适配器（OSA/MSA）
- 工业化居住概念开发
- 米丘德装配厂管理

斯坦尼斯航天中心

- 航天发射系统核心阶段测试
- 航天发射系统 RS-25 发动机测试



一、2024 年人类登陆月球

年份	任务名称	描述
2021	首次月球商业运载任务	2021年，将首先由两家公司向月球表面运送16件仪器，开始首次商业化月球运载服务，为人类探索铺平道路。
阿尔忒弥斯计划的多个『首次』	极地挥发物探测车	该月球车高尔夫车大小，将首次跨越月球大片区域，对月球极地土壤样本进行调查，以确定水等挥发物分布和浓度特征。
	CAPSTONE 微型卫星	首个进入月球近直线晕轨道的航天器——未来月球空间站的基地。测试新的导航技术，验证预测模型，降低轨道的不确定性。
	阿尔忒弥斯-1	无人综合航天发射系统火箭和猎户座飞船的处女航验证飞船性能，并在近华氏5 000度高温下高速重返地球，测试飞船隔热罩。
	PPE 与 HALO	动力与推进装置及居住与保障舱是月球空间站首批组件。由航天局和欧洲航天局实施科学调查，对深空环境进行早期描述。
	阿尔忒弥斯-2	载人试飞为期10天，航天员将创造距离地球最远的人类旅行记录，验证深空通信和导航系统，生命支持系统能保证健康和安
2024	阿尔忒弥斯-3	在以阿尔忒弥斯-1和2为基础，猎户座飞船将再次前往月球，利用人类着陆系统，将第一位女性和下一位男性带到月球表面。

图 2 “阿尔忒弥斯”计划的多个首次

美国重返月球的基础是美国国家航空航天局的深空运输系统：猎户座飞船、航天发射系统（SLS）火箭、载人着陆系统（HLS）和包括现代化太空港在内的探索地面系统（EGS）设施。猎户座飞船由欧洲航天局（ESA）承建的服务模块提供动力，专为深空载人操作设计，最多可容纳 4 名航天员。航天发射系统火箭是重型载人运载火箭，用于发射猎户座飞船并将其送上月球。

到 2021 年，科学和技术将引领美国重返月球（见图 2）。在“阿尔忒弥斯-1”任务中，通过商业化月球运载服务（CLPS）供应商的着陆器，美国国家航空航天局将把第一批载荷投送到月球表面，并利用航天发射系统向太空部署 13 颗微型卫星——其中 5 颗将回传月球数据。在“阿尔忒弥斯”计划下，人类探索将从 2023 年“阿尔忒弥斯-2”任务开始航天发射系统和猎户座飞船的载人飞行测试。与此同时，美国国家航空航天局及其载人着陆系统（HLS）



商业合作伙伴还计划对着陆器系统进行太空飞行测试，包括月球表面测试。美国国家航空航天局的目标是在 2024 年任务实施之前，完成对“阿尔忒弥斯-3”所需的所有硬件、软件和操作系统的太空测试。

（一）“阿尔忒弥斯-1”任务

“阿尔忒弥斯-1”任务中，航天发射系统（SLS）火箭将把无人驾驶的猎户座飞船送入地球轨道，使其进入月球远端逆行轨道，在返回地球之前，它将在月球之外飞行 4 万英里，也就是距离地球约 28 万英里。这次飞行测试至关重要，主要展示航天发射系统（SLS）火箭的首飞性能，并在猎户座飞船以 32 马赫（24 500 英里/小时）的速度返回地球之前，收集整个过程中的工程数据。飞船的月球高速再入是任务的重中之重，也是对隔热罩性能的必要测试，因为在进入地球大气层后、溅落太平洋被回收并进行飞行后的工程评估之前，会加热到接近华氏 5 000 度，达到太阳表面温度的一半。

对于这种没有航天员的配置，将用工程设备替换为航天员配备的部件。在首次飞行中，载人飞行所需的航天员座舱显示器、控制系统和生命支持系统，将被替换为验证性能及与实际飞行数据比较预测模块所需的数据收集工具。在为期 4 至 6 周的任务中，猎户座飞船在返回地球之前将飞行 140 余万英里（约合 160 万千米），超过阿波罗 13 号载人飞船与地球的最远距离记录。这一任务还将部署 13 颗微型卫星，进行新的科学调查和新技术验证，以提升对深空环境的认识，同时与大学、国际合作伙伴和私营公司在月球探索方面开展合作，涉及面比以往任何一次任务都要广泛。

（二）“阿尔忒弥斯-2”任务

任务中，航天发射系统和猎户座飞船首次载人飞行将把 4 名航天员送入月球环境，这是 50 多年来的首次。这将是“阿尔忒弥斯”时代的“阿波罗 8 号时刻”，航天员将以整个地球作为背景，乘坐猎户座飞船从远处拍摄月球。

航天发射系统火箭将把猎户座飞船内的航天员送入太空，飞船在绕地球飞行两圈后开始月球之旅。猎户座飞船将首先到达 115 × 1 800 英里的初始嵌入轨道，在椭圆轨道持续飞行约 90 分钟，随后在近地点通过火箭临时低温



2020 世界载人航天发展报告

推进段（ICPS）首次点火进行调整。在绕地球飞行第一圈之后，火箭的临时低温推进段（ICPS）再次提供推力，将猎户座飞船送入高地轨道（HEO），在距离地球 200 至 59 000 英里的高空沿椭圆轨道飞行约 42 小时。

到达高地轨道（HEO）后，猎户座飞船将与临时低温推进段（ICPS）分离，该推进段在穿过地球大气层之前，还可发挥最后一次作用，那就是用作猎户座飞船航天员近距离操作演示的目标。在这个演示中，航天员在手动模式下操控猎户座飞船的飞行路径和方向。航天员将使用机载摄像机和从飞船窗口看到的画面，在接近和飞离临时低温推进段（ICPS）时与之对齐，借此对猎户座飞船的操控特性进行评估。该演示可提供地面上难以获得的性能数据和操控经验，为关键交会、近距离操控、装备对接以及在“阿尔忒弥斯-3”任务中对接脱离操作做准备。

在近距离操控演示之后，航天员将把控制权交还任务控制员，并在当天剩余的飞行时间里对系统在太空环境中的性能进行验证。航天员将在高地轨道中对生命支持系统的性能进行评估，验证其产生可呼吸空气和去除代谢产生的水蒸气和二氧化碳的能力。他们将脱下发射时穿着的“猎户座飞船机组生存系统”航天服，在后续的太空任务中着便服，直到返回前重新穿上航天服，为进入地球大气层和海上回收做好准备。航天服模式和舱室模式之间的生命支持系统的变化，以及活动期间全体机组代谢率最高时和睡眠期间机组的代谢率最低时系统的不同性能，将确认飞越月球阶段生命支持系统的准备情况。

在在地轨道（HEO），猎户座飞船将超越美国国家航空航天局太空网络的全球定位系统（GPS）导航系统卫星和跟踪数据中继卫星系统（TDRS）的通信卫星，可对深空网络（DSN）通信和导航能力进行先期检测。猎户座飞船到达月球附近开始绕月飞行后，就需要运用深空网络建立任务控制中心与航天员的联系，以便对飞船进行指挥，并更新导航系统，因而此次早期检查可确认是否为执行月球飞越任务做好准备。在猎户座飞船返回地球期间，一旦由高地轨道回到全球定位系统和跟踪数据中继卫星系统覆盖范围，则切换回着陆日使用的全球定位系统（GPS）导航和跟踪数据中继卫星系统（TDRS）通信。



完成高地轨道（HEO）检查程序后，猎户座飞船将执行跨月轨道注入机动（TLI）。由于临时低温推进段（ICPS）完成了将猎户座飞船送入高地轨道的大部分工作，将飞船送入月球自由返回轨道所需的最后推力由猎户座飞船的服务舱提供。跨月轨道注入机动（TLI）将航天员送入为期 4 天的外太空飞行，绕月球远端运行，最终创造出一个从地球延伸超过 23 万英里的“8”字形轨迹，然后在接下来的 4 天返回地球。这一轨道利用了地月重力场的关系节省动力，可确保猎户座飞船在绕月球远端飞行后，会被地球引力自然拉回，而无需增加推力。

（三）“阿尔忒弥斯-3”任务

猎户座飞船及其 4 名航天员将再次前往月球，这一次他们将创造历史，成为首位在月球表面行走的女性和下一位男性。要在 2024 年快速重返月球，要求美国国家航空航天局尽量减少涉及人类登陆月球表面的系统数量，所以当未来登月计划使用月球空间站作为由月球轨道转向月球表面的任务站点时，美国国家航空航天局采购了商用载人着陆系统（HLS），为“阿尔忒弥斯”早期任务中没有使用月球空间站的方案留下余地。

长期来看，月球空间站可为人类和机器人登月任务提供中转站。这个轨道前哨站可延长月球探索的时间，并可在一次“阿尔忒弥斯”任务中多次到达月球表面。月球空间站到月球表面的运行系统也类似于人类火星任务的工作模式，可将航天员留在轨道上，以及部署到月球表面。在人类首次登陆火星之前，通过该系统在月球上获得运行信心是很重要的。

（四）载人着陆系统

美国国家航空航天局选择了蓝源公司、Dynetics 公司和 SpaceX 公司进行载人着陆系统（HLS）开发工作，支持航天员在月球着陆，并在返回地球前安全回到月球轨道。美国国家航空航天局预计前期开发活动大约需要 10 个月，将在 2021 年初进行初步设计审查，选择其中最为成熟的设计，利用“阿尔忒弥斯-3”任务实现人类再次登月。

美国国家航空航天局计划从 2024 年开始执行月球表面载人探测任务，



2020 世界载人航天发展报告

其中包括新型人类着陆（HLS）系统的验证。初步任务是实现 1972 年以来人类首次重返月球，但有几个关键的不同之处，包括使用了 21 世纪的技术，以及进入更多的月球区域。随后的可持续月球表面探索验证任务，将充分利用月球空间站的功能，包括对着陆器的全部或部分组件进行燃料加注和再次使用，以及进行关键的火星任务模拟。美国国家航空航天局和工业界可借此结合各自的专业知识和能力，建立紧密的合作伙伴关系，以应对挑战，然后利用商业服务合同，在 21 世纪后期实现常态化着陆。

（五）“阿尔忒弥斯-3”任务中月球表面行动

除了两名航天员，载人着陆系统还将携带 220 磅（100 千克）的科学工具和设备到月球表面，目标是取回 87.5 磅（35 千克）的样本。在更早期等待着陆器下降段进行测试时，更多的补给可能会在航天员到达之前放置在月球表面。此外，商业化月球运载服务商可为科学仪器和设备预置提供保障，供第一批返回月球的航天员进行月表探索时使用。

在为期一周的首次勇敢探索中，航天员将对该地区的地质特征进行描绘和记录。他们将收集各种样本返回地球，供日后研究之用：岩石样本有助于确定撞击月球的时间顺序；芯管样本可用于捕获在风化层中的古代太阳风；对永久阴影区域内外的材料样本进行配对，以证明挥发物的存在，并对永久阴影区域内外材料之间的岩土差异进行技术评估。

在月球表面时，航天员将居住在上升运载器的舱室内，这是着陆系统的上部，结束月球表面考察结束后，航天员会利用该舱室返回月球轨道。美国国家航空航天局要求在“阿尔忒弥斯-3”任务探索月球表面期间至少进行两次月球行走，目前正在努力降低载人着陆系统运载器的重量，以便为航天服生命支持系统配置更多资源。该任务目标是在重量允许的情况下，让航天员按计划进行 4 次舱外活动，并为一次附加的舱外活动预留额外的消耗品。在这一想定下，第一、第二、第四和第五天将主要集中于月球漫步，以实施科技验证，第五天后半段用于现场清理。清理工作可能涉及保护工具或其他月球漫步工具，供将来的探险使用，并要求将其放置在离着陆器足够远的地方，确保在着陆器升空过程中不会造成危险。第三天是航天员休息、在上升飞船



内进行科学研究和公众互动时间。

在完成这次历史性的月球表面考察后，航天员将从月球表面发射，在月球轨道与搭载了其他队友的猎户座飞船会合。带着从月球采集的原始样本，航天员们开始准备为期三天的返回地球之旅。

（六）月球空间站

“门户”月球空间站的前两个模块动力与推进装置（PPE）以及居住与保障舱（HALO）将在地面进行整合，并在 2023 年利用一枚火箭一同发射。

Maxar 技术公司正在利用地球静止轨道卫星的传统系统开发动力与推进装置（PPE）。飞船的太阳能电力推进系统比目前的系统强大三倍，可为月球空间站提供电力、控制、推力和通信保障。动力与推进装置（PPE）还可为科技验证载荷提供空间。诺斯罗普-格鲁曼公司正在开发居住与保障舱（HALO），这将是航天员访问月球空间站的第一个乘务舱。其主要目的是为来访的航天员在到达猎户座飞船后提供基本的生命支持，并为他们的月球表面之旅做准备。居住与保障舱可提供指挥控制与数据处理、储能与配电、热控制、通讯与跟踪等能力，以及环境控制与生命支持系统，以提升猎户座飞船为机组成员提供支持的能力；还将有数个对接端口用于访问飞船和未来模块，并可用作科学研究和装载空间。

月球空间站最初由 SpaceX 公司提供货物运送，运送加压和非加压货物，包括航天员所需的食物和水、科学仪器以及空间站和月球表面探索所需的物资。

一旦进入月球轨道，月球空间站将进入科学操作阶段。其设计为自主运行，符合国际公认的互操作性标准，可提供一个独特平台，在深空和地球范艾伦辐射带保护之外进行科学调查。国际科学界已经确定，太阳物理学、辐射和太空天气是月球空间站飞行的优先调查项目。前两个载荷是欧洲航天局提供的辐射仪器组件和美国国家航空航天局提供的太空气象仪器组件。



二、拓展探月任务准备登陆火星

完成“阿尔忒弥斯-3”任务之后，美国国家航空航天局及其合作伙伴将着手执行在月球上和月球周围的任务，这也有助于确定人类火星任务的持续时间和运行模式。为了提升人类登月事业的稳健性，美国国家航空航天局、工业界和全球合作伙伴将建立基础设施、系统和机器人任务，使人类能够在月球表面持续生存。为此，美国将拓展月球空间站的能力，提升对商用月球着陆器从空间站发射的信心，并在月球南极建立“阿尔忒弥斯营地”。

（一）月球表面——“阿尔忒弥斯营地”

“阿尔忒弥斯营地”将是美国在月球前沿建立的第一个立足点。“阿尔忒弥斯营地”的三个主要任务组件包括：月球地形车辆（非增压月球车），用于在基地周围运送穿着航天服的航天员；宜居移动平台（增压月球车），可借此离开“阿尔忒弥斯营地”进行长时间旅行；以及月球表面居住地，可在月球表面容纳4名航天员，并在“阿尔忒弥斯营地”和美国在南极的基地驻泊。通信、电力、辐射防护和废物处理与存储计划等基础设施支撑要素，构成了月球上的持续能力，可在未来几十年内建立起来并重复利用，同时也可以对人类深入太阳系开展任务所需系统进行测试。营地其他基础设施可维持一到两个月的月球表面考察消耗，从而可了解更多关于月球和整个宇宙的信息，开发新技术，促进国家工业发展，同时开发新资源，发展新的月球经济。

（二）月球资源

随着人类在月球的持续存在，对月球资源的利用可能会提升运行的安全性和效率，并降低对地球供应的依赖。美国国家航空航天局目前与工业界和学术界合作，投资了几项原位资源利用（ISRU）项目。勘探、提炼和开采技术提高了从月球风化层中寻找和利用资源的能力。化学和热处理的发展可实现对月球自然矿物和化合物的分解，并将其转化为人类消耗品甚至推进剂。其他潜在的长期应用可促进地外金属加工，并利用月球资源建造居住地或其



他月球表面建筑。其中许多技术可在月球上得到验证和改进，以供未来在火星上使用。虽然月球没有大气层，但知道火星的大气层富含二氧化碳，因此美国国家航空航天局也在投资一些项目，重点关注大气中二氧化碳的提取并转化为其他有用元素或化合物。

（三）在轨道上——月球空间站

月球空间站将打造美国的领导地位，并与国际伙伴在月球和地球之间建立前哨站。该轨道前哨站还可提供独特的平台进行科学调查，并有可能导航到不同的绕月轨道。

与国际空间站相比，月球空间站是一个规模较小且更为集中的平台，美国国家航空航天局正在吸取多个供应商共同推进月球架构的经验教训，可提供互补能力（乘员系统、推进器、后勤、科学平台、技术验证等），提高月球架构的整体成功率和适应性。早期对一系列国际深空互操作性标准的定义，奠定了一定的基础，商业和国际合作伙伴可在此基础上以“即插即用”模式进入深空探索架构。美国国家航空航天局和国际社会合作制定标准，对交互界面和环境进行定义，促进深空探索合作。这些标准关注探索计划早期阶段中优先考虑的主题，无意规定界面之外的设计特性，标准包括：航电设备、通信、环境控制与生命支持系统、电力、交会、机器人、热控制和软件。

三、“阿尔忒弥斯”计划资金需求

美国国家航空航天局的“阿尔忒弥斯”计划将带领人类重返月球，并为人类探索火星做准备。此月球探索战略有两项主要工作同时推进：1）近期着重于 2024 年前在可接受的技术风险下实现人类先期登月；2）构建可持续系统，明确初期任务，推进美国载人航天计划，在下个十年保持在月球的稳定存在。美国国家航空航天局将其分别称为“阿尔忒弥斯”第一阶段和“阿尔忒弥斯”第二阶段。除了前两个“阿尔忒弥斯”阶段之外，第三阶段的任务涵盖了整个工程。任务支持包括美国国家航空航天局的能力、工作人员以



2020 世界载人航天发展报告

及成功推进阿尔忒弥斯计划的重要设施。本附件简要列出 2025 年财年之前所需资源。这些资源需求与总统对美国国家航空航天局 2021 财年的预算要求一致。

对 2024 年重返月球的评估包括探索系统开发项目、“阿尔忒弥斯-1/2/3”任务、载人着陆系统的开发与操作、月球表面航天服和后勤保障所需的资金。

探索系统开发 (ESD)：探索系统开发项目的任务是开发运载火箭、航天器和必要的地面支持系统，将航天员送出近地轨道。该项目包括 3 个子项目：猎户座飞船、航天发射系统 (SLS) 和探索地面系统 (EGS)。

载人着陆系统 (HLS)：该项目将与商业伙伴联合开发和部署着陆系统，用于载人往返月球表面。美国国家航空航天局预计其商业合作伙伴将在整个开发过程中大量利用美国国家航空航天局的技术和专业知识，从而在 2024 年开发出可将人类送上月球表面的月球运输系统，并为随后的载人任务开发和验证更具可持续性的载人着陆系统。

月球表面航天服 (保留在月球空间站预算中)：美国国家航空航天局正在开发的舱外移动单位 (xEMU) 航天服系统能够支持在月球表面和微重力环境下的太空行走。在回到猎户座飞船准备返回地球之前，航天员将穿着舱外航天服对月球表面进行长达 7 天的探索。该项目的资金保留在月球空间站预算之内。

月球表面后勤保障 (保留在先进月地与月球表面能力预算中)：美国国家航空航天局正在努力发展必要机制，提供必要的供应，支持在月球表面的“阿尔忒弥斯”任务。该系统第一阶段的工作将促进人类空间探索技术研究和开发，并在近期将重点放在技术发展优先事项上，例如：自主操作、灰尘消除和极端环境技术。太空技术任务处的目标是为月球空间站的动力和推进组件提供太阳能电力支持，开发精准着陆和低温流体管理技术。

科学组件——月球发现与探索项目 (LDEP)：月球发现与探索项目是美国国家航空航天局探索战略的关键组成部分。该项目包括建立月球着陆运输服务的商业合同、月球科学仪器开发、长期勘探与应用需求、开发可实现创新调查的小型卫星、月球侦察轨道飞行器的持续运行、利用商业着陆器到达月球表面的长时月球车开发。

表 2 摘要列出了到 2025 年财年“阿尔忒弥斯”第一阶段的资金需求。其投资计划反映了整个 2021 年财年在总统要求范围内第一阶段的当前需求。



表 2 “阿尔忒弥斯”计划第一阶段的资金需求

百万美元	2021 财年	2022 财年	2023 财年	2024 财年	2025 财年	合计
猎户座飞船/SLS/EGS（探索系统发展项目）	2 894.7	2 070.6	1 487.6	919.0	252.0	7 623.9
初期载人着陆系统	3 222.5	3 553.1	4 100.4	3571.3	1719.0	16 166.4
月球组件—月球空间站保留预算	177.3	141.0	94.2	63.1	42.5	518.1
月球表面后勤—先进月地空间与月球表面能力（ACSC）保留预算	67.6	69.2	141.9	196.0	77.7	552.4
探索技术	251.0	292.0	268.0	223.0	158.0	1 192.0
月球发现与探索项目（LDEP）—科学任务处阿尔忒弥斯科学组件保留预算	451.5	517.3	491.3	458.3	—	1 918.3
第一阶段总需求	7 064.7	6 643.1	6 583.4	5 430.7	2 249.2	27 971.1

与美国国家航空航天局此前提出的 2028 年登月概念相比，“阿尔忒弥斯”第一阶段的资金需求更为有效和直接，见图 3。虽然对资金的需求有所加速，而且短期资金也相对增加了，但 2024 年第一阶段工作的总体资金需求并没有增加，有助于保持月球存在的持续性并推进未来太空探索。

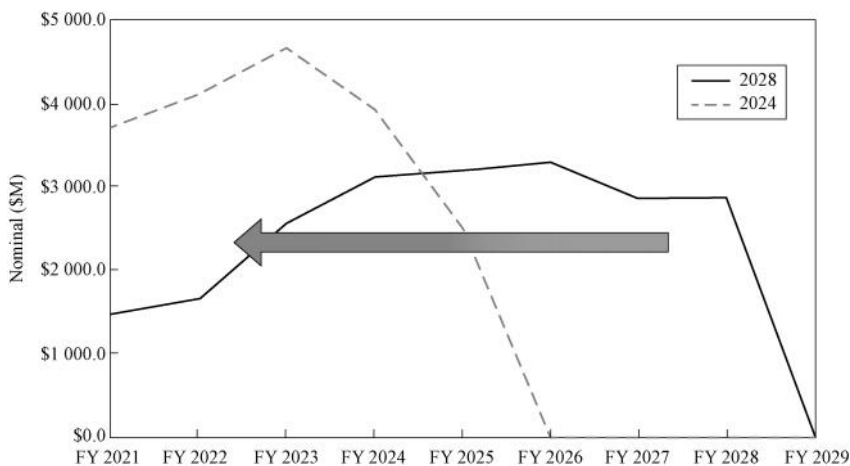


图 3 用于 2024 年登月的“阿尔忒弥斯”第一阶段资金总额并未超出此前的 2028 年登月预算

