

天舟一号飞行任务综述

摘要：2017年是中国载人航空气间实验室阶段任务圆满完成的一年、成果丰硕的一年。根据载人航天工程空间实验室飞行任务规划，经过工程全线精心准备，顺利实施了天舟一号飞行任务，实现了准确进入轨道，精准操控对接，稳定组合运行，顺利实施补加，安全受控再入的任务目标，标志着我国已经完全掌握了载人往返运输、空间交会对接和推进剂在轨补加技术，具备建造和运营近地轨道空间站的能力，具备执行长期载人飞行的能力，具备将人类送入近地轨道以远拓展生存空间的能力，也标志着中国载人航天进入空间站时代。

一、任务目标

天舟一号飞行任务为新研制的货运飞船和长征七号运载火箭组成的空间站货物运输系统的首次飞行试验。主要目标是：

(1)在文昌航天发射场利用长征七号运载火箭发射天舟一号货运飞船，并与天宫二号空间实验室完成交会对接，实施推进剂在轨补加，突破和掌握推进剂补加技术；

(2)考核工程各相关系统执行飞行任务的功能、性能，以及系统间的匹配性和协调性。

(3)开展空间科学实验和技术试验。同时，通过本次飞行任务开展了绕飞交会对接、货运飞船控制组合体、自主交会对接、

受控再入等相关验证试验，为空间站的建造和运营奠定基础。

二、天舟一号飞行任务基本情况

依据任务规划，在天舟一号飞行任务准备过程中，工程总体及时明确了飞行任务目标、各系统主要任务和技术要求、系统间接口关系等重大问题；研究制定了飞行任务大纲、测发流程、飞控要点、故障预案等总体技术文件，细化明确了测试发射工作流程、质量控制节点，任务性质与目的、任务要求、各系统参试状态、飞行任务方案要点和各飞行阶段飞控工作要点、放行要求及任务考核标准等，为任务明确了具体的目标要求，为各系统进行扎实有效的任务准备工作创造了先决条件。工程各相关系统和单位据此完成了任务实施方案和相关预案制定工作，以及产品研制和任务准备工作，各系统主管部门依据工程管理规定和任务放行准则，对研制工作进行了严格的审查把关和出厂放行评审。

（一）任务方案和主要技术状态

1. 天舟一号货运飞船

天舟一号货运飞船为新研产品，由货物舱和推进舱组成，全长 10.6 米，舱段最大直径 3.35 米，太阳翼展宽 14.9 米，起飞质量不大于 13000 千克，上行物资总装载量不小于 6000 千克，具备独立飞行不小于 3 个月的能力。

天舟一号货运飞船安装差分卫星导航兼容接收机、微波雷达、激光雷达、交会对接光学成像敏感器、手控遥操作支持设备以及 S 波段空空通信机、舱外照明设备等交会测量相关设备；配置 USB 应答机、S 波段数传机、Ka 和 S 波段窄波束中继终端、S 波段宽波束中继终端；货物舱前端安装主动式对接机构；配置平移和反推发动机。具备自动和手控遥操作交会对接与分离、避撞以及对接后信息并网功能。

天舟一号货运飞船还搭载了 10 项应用载荷，装载了补加用推

进剂、航天员系统和空间站系统部分货物，以及能够覆盖各类典型货物安装工况的模拟货物。

2. 长征七号运载火箭

长征七号运载火箭为捆绑式二级液体火箭，采用液氧和煤油推进剂。火箭全长约 53 米，起飞质量约 597 吨，运载能力不小于 13500 千克。芯一级直径 3.35 米，捆绑 4 枚直径 2.25 米助推器，整流罩直径 4.20 米。CZ-7 火箭由箭体结构、发动机及增压输送、控制及测量、总控网及测发控、地面发射支持系统组成。

3. 文昌航天发射中心

发射场为文昌航天发射中心，包括技术区、发射区及配套设施设备。发射支持系统采用新型活动发射平台完成火箭和有效载荷的垂直运输，地面设备放置在发射平台前置设备间，通过脐带塔摆杆和箭体连接实现转场过程气、液、电等接口不断开，进入发射区后可实现短期内快速发射。

4. 天宫二号空间实验室

天宫二号空间实验室由实验舱和资源舱组成，全长约 10.4 米，舱体最大直径 3.35 米，太阳翼展宽约 18.4 米。密封舱为航天员驻留场所，可储存消耗品；实验舱前端框安装被动式对接机构，舱外安装交会支持设备；推进分系统增加配置压气机、浮动断接器被动端等设备，用于推进剂补加技术验证。

(二) 实施情况

空间应用系统于 2017 年 2 月 9 日进场，先后完成了产品自测、验收交付、货船总装等工作；航天员系统产品于 2 月 13 日随天舟一号货运飞船进场，完成了气体采样分析、舱外航天服力学传感器安装及打包交付、23 个上行乘员生活物资货包安装确认、货物信息收集整理、微生物采样分析等工作；天舟一号货运飞船于 2 月 13 日进场，完成了货物舱和推进舱总装、两舱对接、状态设置、电测和推进剂转注等工作；长征七号遥二火箭于 3 月 10 日

进场，完成了箭体恢复、总装、测试、总检查、转运和推进剂加注等工作；海南发射场系统完成了火箭、航天器等产品进场各项保障工作，发射场流程总时间为 64 天。

2017 年 4 月 20 日 19:41:28，天舟一号货运飞船由长征七号遥二火箭从文昌航天发射中心 2 号塔架发射，火箭飞行 601.2 秒后船箭分离，天舟一号货运飞船准确入轨。经远距离导引段、自主控制段和对接段的飞行，2017 年 4 月 22 日与天宫二号空间实验室对接形成组合体，随后天舟一号货运飞船开展相关验证试验。4 月 23 日~4 月 28 日顺利完成了第一次推进剂补加试验，同时天舟一号货运飞船与天宫二号空间实验室组合体开展相关试验。6 月 14 日~6 月 19 日，天宫二号空间实验室顺利完成了与天舟一号货运飞船第二次推进剂补加试验、天舟一号货运飞船控制组合体飞行试验和天舟一号货运飞船绕飞对接试验，6 月 21 日天舟一号货运飞船与天宫二号空间实验室分离，各自转入独立运行状态。

之后，天舟一号货运飞船完成了 3 个月的独立飞行试验，天宫二号空间实验室进入约 400 千米高度自主运行轨道。9 月 13 日~9 月 16 日，完成了天宫二号空间实验室与天舟一号货运飞船的自主交会对接试验、第三次推进剂在轨补加，9 月 17 日组合体分离撤离，天舟一号货运飞船受控再入，天宫二号空间实验室转入长期独立飞行阶段。这些工作的顺利实施，标志着天舟一号飞行任务获得了圆满成功。

三、取得的成果

天舟一号飞行任务是我国空间实验室阶段任务的收官之战，也是长征七号运载火箭和天舟一号货运飞船组成的货物天地运输系统的首次飞行，任务的圆满成功不仅标志着空间实验室任务的圆满完成，也为我国载人航天进入空间站时代奠定了坚实的基础。

(一) 成功研制并验证了空间站货物运输系统

为确保空间站任务的顺利实施，研制了由 CZ-7 运载火箭和天舟货运飞船构成的空间站货物运输系统。通过 CZ-7 Y1 火箭和 Y2 火箭的成功飞行，验证了火箭总体方案的正确性，运载能力满足任务要求。货运飞船总重 13.5 吨，最大装载货物和推进剂的能力达到 6.5 吨，货物装载比优于国外货运飞船，模块化构型为其应用提供了更大空间。同时货运飞船首次飞行就顺利完成了独立飞行、交会对接、推进剂补加和受控再入等工作，验证了总体方案的正确性。文昌航天发射中心在产品进场测试、射前准备、点火发射等过程中提供了有力的保障，确保了任务的顺利实施。各系统的协作配合，圆满完成了空间站货物运输系统的首次飞行，为空间站建造和运营奠定了坚实基础。

(二) 突破了推进剂补加技术

推进剂在轨补加是我国首次开展的航天器在轨补加试验及应用活动，也是空间站运营必须攻克的关键技术。空间实验室系统和货运飞船系统基于船器补加程序一体化思路，提出了覆盖推进剂在轨补加全过程的多航天器一体化自主协同控制方案，确保了船器快速、精准、可靠的协同控制；通过在 TG-2 推进子系统的基础上增加旁路，将推进子系统与补加子系统的一体化设计，实现了推进功能与补加功能既相互融合，又能相互隔离，解决了推进剂补加过程中组合体的自主控制问题。通过本次任务的三次补加，全面突破和掌握了推进剂在轨补加技术，为空间站建造和运营奠定了基础。

(三) 突破了自主交会对接技术

交会对接过程中减少地面测控的支持，全程自主是未来发展的主要趋势，为验证相关技术，本次飞行任务开展了自主交会对接试验，历时 6 小时 38 分钟，一是缩短了飞船与在轨飞行器交会对接的时间，可用于提升载人航天应急救援能力、扩大发射窗口；

二是采用了基于 BD-GPS 定位数据的飞行器自主测定轨技术，减少对地面测定轨的依赖，使飞行器自主定轨能力实用化；三是采用了全程自主控制，正常情况下不需地面注入轨控参数，实现了交会对接全过程自主计算制导脉冲参数、自主控制。通过本次试验，验证了自主交会对接总体方案，增强了飞船在交会对接过程中的自主性，优化了交会对接飞控模式，突破并掌握了远距离自主导航与制导、自主多脉冲制导等关键技术，为航天器入轨自主交会对接奠定了基础。

(四) 取得了丰硕的科学实验成果

天舟一号飞行任务中，空间应用、特殊技术试验领域、航天技术试验领域装载了大量的试(实)验项目，取得了丰硕的成果。

空间应用开展了微重力对细胞增殖和分化影响研究，首次微重力环境下利用人类胚胎干细胞体外分化获得原始生殖细胞、首次发现微重力环境下诱导型多能干细胞可向心肌分化，并加速诱导型多能干细胞心肌分化进程，增加了对干细胞生物学特性的认识；空间生物反应器成功验证了高通量(48 组样品)细胞空间培养技术和自动搜索定位识别显微成像技术；两相系统实验平台研究首次获得空间液滴-液膜蒸发相变速率“图谱”，获取了空间蒸发换热系数的相关数据；非牛顿引力实验验证了空间高精度静电悬浮加速度计技术，在轨测量到 10^{-9} 量级的加速度变化信号(地面测试能达到 3×10^{-10} 量级)，加速度计整体性能达到国际先进水平；主动隔振关键技术验证项目验证了六自由度电磁悬浮控制技术、高精度位姿测量技术和电磁激励器技术，首次实现了微重力水平达到 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 量级，成为世界上第三个采用磁悬浮主动隔振控制技术的国家。

特殊技术试验领域国内首次、国际继美国后第二个国家在轨开展了星光折射导航试验，验证了星光大气折射理论正确性、初步评估了星光折射自主定位导航精度，验证了星光折射导航作为

一种新型天文导航技术的可行性，突破了精确建模与临边背景下折射角高精度提取关键技术，促进了星光折射导航技术向工程化应用的转化。

航天技术试验领域的“自主可控”元器件试验验证了部分国产化元器件及先进 COTS 器件的可用性；立方星在轨部署发射器试验从释放和捕获两个方面验证了微纳卫星在轨部署发射技术可行性和有效性；空间环境监测与控制试验首次在轨验证了电位主动控制技术，获取货运飞船轨道电位数据；发动机羽流遥感监测试验首次获取发动机点火羽流紫外辐射图像，验证了非介入式探测技术的可行性；飞行器次生环境带电效应试验首次使用全向电子能谱仪实现更大探测视场范围的空间等离子体环境探测，首次实现空间飞行器磁场矢量探测；先进 GNC 装置平台甚高精度三浮陀螺首次获得了基于动压气浮轴承的永磁同步电机在微重力环境下的运动特征，突破了陀螺电机可靠启动这一瓶颈技术；高精度星敏感器单星位置误差 X、Y 轴均小于 $1.25''(3\sigma)$ ，极限星等到达 10.5 等，为光学舱使用奠定了基础；光子晶体光纤陀螺尚属世界首例；SOC2012 高性能计算机首次实现 SpaceWire 作为内部数据总线的在轨应用，为光学舱 GNCC 研制奠定了基础。

这些试(实)验项目的成功实施和取得的成果，为空间站建造和运营阶段空间应用试(实)验项目的选择、研制和在轨试验提供了方法，为将空间站建设成为国家太空实验室奠定了基础。

(五) 提升了元器件的国产化、自主化水平

大量的国产化元器件的正常工作保证了 TZ-1 飞行任务的圆满成功。TZ-1 飞船牵头开展了 100V 输入抗辐照厚膜电源系列、BM3803FMGRH 微处理器、1553B 总线器件 JKR63825 等七大类 44 种国内新研制的元器件产品的在轨验证和工程应用，发现了 100 伏输入抗辐照厚膜电源内部电容器设计、生产、工艺和环境适应性方面的问题，发现了 BM3803MGRH 微处理器高温下 1000 兆主

频下性能稳定性下降问题和改进后 BM3803FMGRH ESD 性能不足、应用不当问题，发现了 JKR63825 和进口 BU-61585 断电后电路内部的 SRAM 出现数据保持不一致等问题，掌握了相关元器件的使用条件和设计规律。在空间站任务研制过程中，结合在轨验证情况，消除国产元器件在设计、工艺和保证能力方面的薄弱环节，细化设计规范和标准，采用降额、冗余、裕度、抗辐照、热等综合设计方法，提高元器件产品的可靠性和成熟度，为空间站系统元器件国产化应用奠定了基础。

(六) 首次实施了分布式和集中式相结合的飞控模式

针对天舟一号飞行任务的特点，首次探索实施了分布式与集中式相结合的飞控模式。在货运飞船发射、交会对接等重要飞控事件期间，各系统试验队进驻飞控现场开展飞控实施工作；在载荷试验、飞船长管一般飞控事件期间，由北京中心为主监视和操作，相关系统试验队在各自的支持中心工作，根据任务分工进行数据接收和监视处理，必要时提供远程支持。改变了以往任务单纯依靠集中式飞控的工作模式，为空间站阶段飞控实施积累了经验。

四、未来展望

2017 年载人航天工程天舟一号飞行任务的圆满成功，实现了既定任务目标，为空间实验室阶段飞行任务划上了圆满的句号，为空间站建造和运营的奠定了坚实基础。

在分享任务成功喜悦的同时，我们也要清醒地认识到，载人航天工程“三步走”战略的最后一步“空间站任务”更加艰巨繁重，“三步走”战略实施完成后，后续发展任重而道远。一是空间站建造任务迫在眉睫，在短短的 4~5 年之内，要完成 10 余次飞行任务，不仅有成熟产品的研制生产，而且还有新的航天器研制工作。2017 年 7 月长征五号遥二火箭发射失利直接影响了长征五号 B 火

箭的研制工作和空间站建造任务总体规划，如何尽快消除潜在的风险、提高产品的可靠性，确保长征五号 B 火箭连续多次发射任务成功，压力异常严峻；空间站核心舱、实验舱 I 和实验舱 II 陆续从初样研制转入正样研制，地面试验的充分性、覆盖性以及正样产品的可靠性，甚至再生生保、机械臂、出舱活动等重大关键技术的验证情况，直接影响空间站建造任务的顺利实施。二是载人航天后续发展尤为重要，美国、俄罗斯均制定了 2030 年前后重返月球、2040 年前后登陆火星的计划，甚至以 SpaceX 为首的私营企业也制定了相应的目标蓝图，载人航天作为航天强国的重要标志，后续发展战略如何与国民经济的发展、航天梦和强国梦的有机结合，开创一条具有中国特色的载人航天发展之路。

人类探索太空永无止境，载人航天发展任重道远。在大力弘扬载人航天精神的同时，精心做好空间站研制建造任务，确保实现既定任务目标，不断开创载人航天事业纵深发展，为建设富强民主文明和谐的社会主义现代化航天强国而努力奋斗。

(中国载人航天工程办公室工程总体室)