



我国天宫空间站研制及建造进展

王翔, 王为*

北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* 联系人, E-mail: wei99_w@163.com

2022-04-28 收稿, 2022-07-03 修回, 2022-07-05 接受, 2022-07-08 网络版发表

摘要 我国天宫空间站作为世界上第3座多舱段在轨组装建造空间站, 采用了符合我国国情的适度规模设计, 注重突出中国元素和核心内涵, 建成后将成为中国人的太空家园和国家太空实验室. 本文首先对天宫空间站的总体方案和采用的关键技术进行了介绍, 然后回顾了天宫空间站的主要研制历程、研制中的大型试验以及应用的先进数字化研制方法, 最后介绍了天宫空间站在轨建造进展, 并对未来发展进行了展望.

关键词 天宫空间站, 系统方案, 研制试验, 组装建造

空间站是人类探索太空的前哨站. 经过50多年的发展, 空间站在空间科学研究、技术试验、科普教育等方面取得了重大成果, 显著推动了人类文明进步, 也成为衡量一个国家综合国力的重要标志. 根据我国载人航天三步走的发展战略, 2010年9月, 中央专门委员会批准实施载人空间站工程, 历经十余年研制, 2021年4月29日, 我国天宫空间站第一个舱段——天和核心舱从海南文昌航天发射中心成功发射入轨, 开启了我国空间站的在轨建造进程. 天宫空间站的设计从我国国情出发, 遵循规模适度, 有所为、有所不为的原则, 突出中国元素和核心内涵, 充分采用当代先进技术, 实现跨越式发展, 注重应用效益和运营经济性, 走可持续的发展道路^[1,2]. 天宫空间站建成后将成为中国人的太空家园, 实现中国人在太空的长期驻留和工作, 同时也将作为我国的国家太空实验室, 为人类的太空探索 and 空间技术进步贡献中国力量^[3].

本文从总体方案、关键技术、研制历程、建造进展和未来展望等方面对天宫空间站进行了介绍, 有助于全面了解天宫空间站研制及建设进展情况, 为后续空间站的运营和应用提供参考和借鉴.

1 国外空间站发展现状

国外在空间站技术发展方面最具代表性的是俄罗斯的和平号空间站与以美国为首的15国联合建造的国际空间站.

1.1 和平号空间站

和平号空间站的第一个舱段核心舱于1986年发射, 到1990年苏联时期建造了3个舱段. 1995~1996年, 俄罗斯时期又发射了3个舱段. 2001年3月受控离轨, 和平号空间站共在轨运行15年. 该空间站包含核心舱、量子1号舱、量子2号舱、晶体舱、光谱舱和自然舱6个舱段, 是世界上第一个多舱段在轨组装建造空间站, 采用多模块积木式整体构型, 各模块分次发射, 采用在轨交会对接和舱段转位的方式组装建造.

和平号空间站在轨运行期间, 先后有28个长期乘组和16个短期乘组, 12个国家的104名航天员在轨驻留; 共有62艘进步号货运飞船向和平号空间站运送了近150 t物资, 31艘联盟号飞船运送80人次、5架航天飞机运送57人次航天员往返和平号空间站.

引用格式: 王翔, 王为. 我国天宫空间站研制及建造进展. 科学通报, 2022, 67: 4017–4028

Wang X, Wang W. Development and construction progress of the Tiangong space station in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 4017–4028, doi: [10.1360/TB-2022-0499](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0499)

1.2 国际空间站

国际空间站的建造始于1998年, 完成于2011年, 共历时14年, 是迄今人类研制的规模最为庞大的航天器. 国际空间站原定于2020年退役, 后计划延期运行至2024年退役, 并有意进一步延长运行寿命. 国际空间站重约423 t, 可容纳6~7名航天员长期在轨工作. 国际空间站整体构型由立体交叉的两大大部分构成: 一部分是互相连接能够供航天员生活工作的密封舱段, 包括6个实验舱、1个居住舱、3个节点舱, 形成国际空间站的核心部分; 另一部分由桁架结构组成, 其上安装有4对大型太阳能电池翼、机械臂系统以及其他舱外仪器设备, 是国际空间站的能源及在轨服务部分^[4].

国际空间站的航天员运送主要采用俄罗斯联盟号载人飞船、美国的航天飞机以及SpaceX公司的载人龙飞船. 物资运输主要采用俄罗斯的进步号货运飞船、欧洲ATV货运飞船、日本的HTV货运飞船、美国SpaceX公司的龙货运飞船和诺格公司的天鹅座货运飞船. 到目前为止, 国际空间站在轨运行期间, 先后有110个航天员乘组驻留; 共有37架次航天飞机、67艘联盟号载人飞船、6艘龙载人飞船、82艘进步号货运飞船、5艘ATV货运飞船、9艘HTV货运飞船、26艘龙货运飞船、18艘天鹅座货运飞船与国际空间站对接, 进行人员和物资运输.

1.3 发展趋势分析

和平号空间站属于积木组装式多舱段空间站, 各舱段自行发射入轨, 在轨交会对接并转移位置后形成空间站组合体. 国际空间站属于桁架结构多舱段空间站, 主要通过航天飞机运送舱段和桁架进入太空并在轨组装建造. 由于航天飞机在安全性设计方面存在问题而退役, 空间站的结构形式有从桁架结构向积木组装结构回归的趋势, 包括我国的天宫空间站以及俄罗斯和欧洲提出的未来空间站构想都采用积木组装的结构形式.

此外, 国际空间站系统过于庞大复杂, 在轨建造耗时14年且过程曲折, 严重限制了其在轨运营效益的发挥. 建造完成后, 每年运营维护的代价巨大, 各参与国均面临沉重的资金负担, 投入产出比不高. 有鉴于此, 空间站的发展有从追求庞大规模, 向规模适度、注重应用效益方向转变的趋势.

2 天宫空间站系统方案

天宫空间站定位为我国的国家级太空实验室和国际科技合作交流平台, 其任务主要包括3个方面: 一是完成以天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱为基本构型的多舱段空间站的组装建造, 并长期在轨可靠运行; 二是保障航天员长期在轨健康生活、有效工作; 三是开展多领域的空间科学实验与技术试验, 推动空间科学技术发展^[5]. 天宫空间站的建造和运营将使我国掌握近地空间长期载人飞行技术, 具备较大规模、长期有人照料的空间应用能力, 显著提升我国综合开发利用太空资源的水平.

2.1 总体方案

天宫空间站基本构型为三舱T字构型, 3个舱段分别为天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱. 天和核心舱居中, 问天实验舱和梦天实验舱分别连接于两侧. 天宫空间站设置有前向、后向和径向3个对接口, 载人飞船主要对接于前向和径向对接口, 货运飞船主要对接于后向对接口, 巡天空间望远镜对接于前向对接口.

天宫空间站三舱的基本情况分别如下.

(1) 天和核心舱. 天和核心舱由节点舱、生活控制舱及资源舱3部分组成, 长度为16.6 m, 最大直径为4.2 m. 天和核心舱配置1个前向对接口、1个后向对接口、1个径向对接口和2个侧向停泊口. 前端的节点舱可兼作航天员出舱活动气闸舱, 上方设置出舱活动口. 天和核心舱内设3个航天员睡眠区和1个卫生区, 舱外配置大机械臂, 两侧安装太阳能电池翼及相应的单自由度驱动机构.

天和核心舱负责天宫空间站平台的统一管理和控制, 支持其他舱段以及来访飞行器的交会对接、转位与停泊; 为航天员在轨工作和生活提供保障条件, 支持航天员长期驻留; 为航天员出舱活动提供保障, 包括进出舱气闸、机械臂转移、舱外通信与照明等支持功能. 配置舱内实验设施, 支持开展密封舱内空间科学实验和技术试验.

(2) 问天实验舱. 问天实验舱由工作舱、气闸舱、资源舱3部分组成, 长度为17.9 m, 最大直径为4.2 m. 配置舱外实验平台, 用于安装舱外实(试)验载荷. 配置小机械臂用于舱外载荷照料和支持航天员出舱, 尾部在局部桁架结构上安装太阳池翼及其双自由度驱动机构.

问天实验舱在轨完成与天和核心舱交会对接、舱

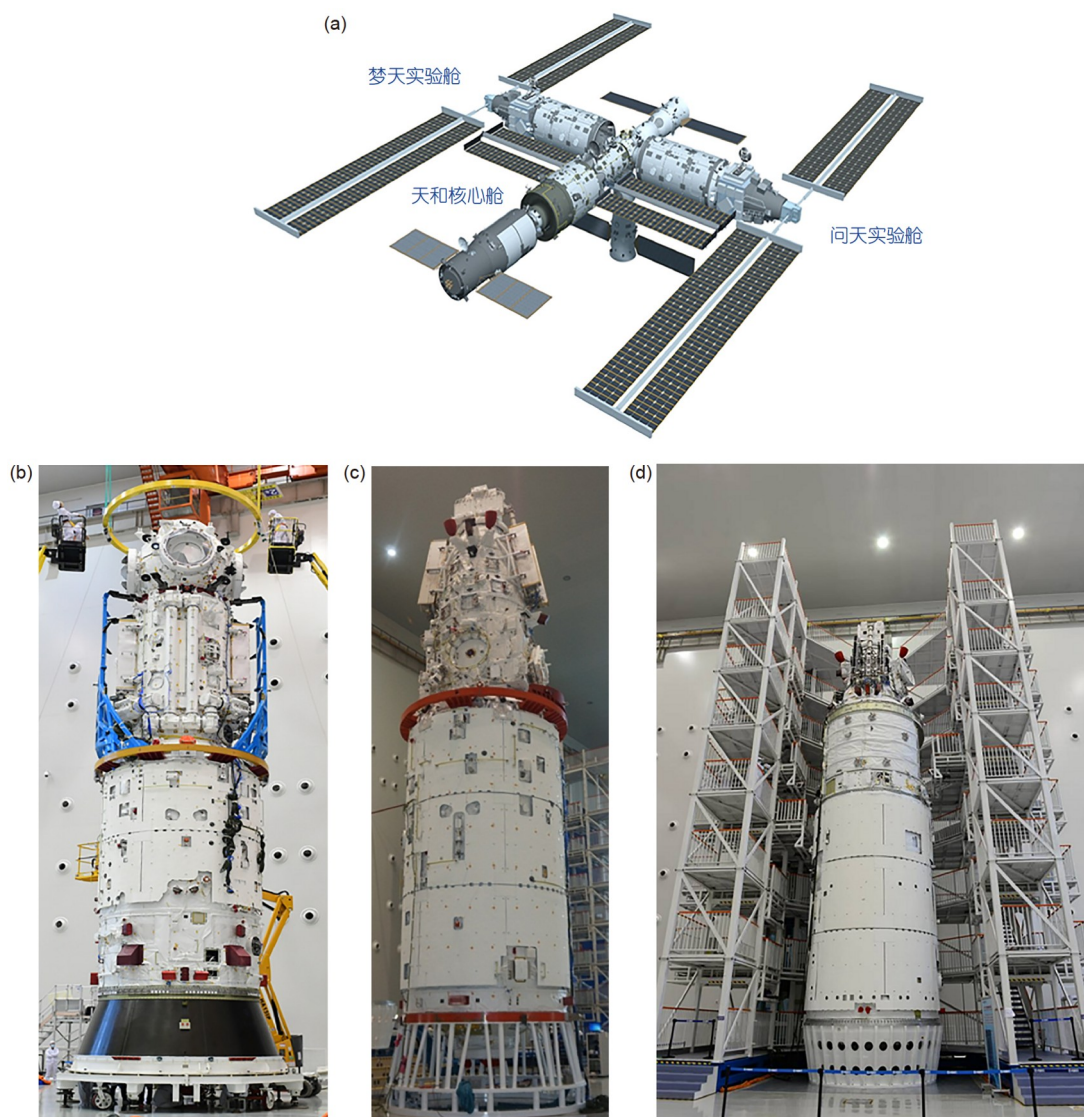


图1 (网络版彩色)天宫空间站舱段组成。(a) 天宫空间站组合体;(b) 天和核心舱;(c) 问天实验舱;(d) 梦天实验舱

Figure 1 (Color online) Composition of Tiangong space station. (a) Tiangong space station assembly; (b) Tianhe core module; (c) Wentian experimental module; (d) Mengtian experimental module

段转位及停泊,对天和核心舱关键平台功能进行备份,包括:能源管理、信息管理、姿态与轨道控制、载人环境控制等。问天实验舱为航天员出舱提供了专用气闸舱,并可作为航天员应急避难场所保证航天员安全,同时支持开展舱内和舱外空间科学实验和技术试验。

(3) 梦天实验舱。梦天实验舱由工作舱、货物舱、载荷舱、资源舱4部分组成,长度为17.9 m,最大直径为4.2 m。舱外设置展开式载荷试验平台,发射入轨后在轨展开。尾部在局部桁架结构上安装太阳能电池翼及其双自由度驱动机构,与问天实验舱状态一致。

梦天实验舱在轨完成与核心舱交会对接、船段转

位和停泊;为航天员在舱内开展研究工作提供保障条件,保证航天员安全;同时,为开展舱内及舱外空间实(试)验提供支持,配置货物气闸用于实现设备自动进出舱。

2.2 关键技术

天宫空间站在我国载人航天工程前期的技术基础上,重点突破了空间机械臂、高效电源系统、物化再生保、在轨推进剂补加等关键技术。

2.2.1 空间机械臂技术

天宫空间站在天和核心舱配置1个7自由度大机械



图2 (网络版彩色)天宫空间站大机械臂
Figure 2 (Color online) Big robot arm of Tiangong space station

臂,作业半径为10 m,最大负载25 t,在问天实验舱配置1个7自由度小机械臂,作业半径为5 m,最大负载3 t.两个机械臂均配置了丰富的视觉测量、关节力矩、末端力等传感器,可独立、组合或协同使用,完成舱段转位、辅助航天员出舱、舱外货物转移、舱外载荷照料、悬停捕获来访飞行器等在轨任务.大机械臂主要负责大负载、大范围转移,小机械臂主要负责小负载、精细化操作,组合臂主要执行航天员或舱外载荷的大范围操作任务,双臂组合后作业半径可达15 m^[6].

大小机械臂均具有在空间站舱体表面爬行的能力,舱体表面安装有机械臂适配器,机械臂能够以头尾互换的方式在适配器上爬行,大大提升了机械臂的活动范围和任务灵活性.

2.2.2 高效电源系统技术

为提升发电能力并降低系统重量,天宫空间站采用大面积柔性太阳翼作为发电设施,三舱各配置2个太阳翼,其中天和核心舱太阳翼展开长度为12.6 m,问天与梦天实验舱太阳翼展开长度为27 m.太阳翼粘贴发电效率为30%的三结砷化镓电池片,天宫空间站整站发电功率约为27 kW,配备了锂离子电池储能.为了保证太阳翼能够在阳照区随时正对太阳,提高发电能力,两个实验舱太阳翼采用双自由度驱动机构实现对日定向.

由于三舱T字构型情况下舱体和两个实验舱太阳翼对天和核心舱太阳翼遮挡严重,导致其发电能力大幅降低,因此三舱组装完成后,将天和核心舱太阳翼收拢、拆卸、转移到两个实验舱尾部安装,以减少遮挡,拓展整站的发电能力.太阳翼转移过程由航天员出舱

在机械臂辅助下完成.

2.2.3 物化再生生保技术

为降低对航天员生活消耗品的补给需求,天宫空间站采用物化再生生保技术进行舱内载人环境的控制.天和核心舱与问天实验舱均配备了全套物化再生生保系统,其中天和核心舱再生生保系统作为主份工作,问天实验舱再生生保系统作为备份.天宫空间站再生生保系统采用物理化学再生方式,包含了电解制氧、微量有害气体去除、CO₂去除、水处理、尿处理5个子系统^[7].

航天员在轨产生的CO₂通过可再生吸附剂吸附,并利用舱外真空条件实现热解吸.采用化学吸收、物理吸附、常温催化氧化和高温催化氧化等手段对不同的微量有害气体进行去除,然后通过真空热解吸将再生吸附装置吸附的微量有害气体排到舱外,实现吸附剂的再生.航天员尿液经尿处理系统蒸馏后形成尿蒸馏水,然后水处理系统对系统收集的冷凝水和尿蒸馏水统一进行净化处理.尿处理子系统与水处理子系统联合工作的综合水回收率约为83%,净化后的水质可以达到饮用水和电解制氧用水要求.电解制氧系统通过电解水提供航天员在轨所需的氧气,是航天员长期驻留的主要氧气来源.

2.2.4 推进剂补加技术

为了实现天宫空间站在轨长期运行,在天和核心舱配置了推进剂补加系统,接受由天舟货运飞船所携带的推进剂.补加系统采用基于膜盒贮箱和增压气体复用的推进剂补加方案,配置了长寿命高可靠压气机,实现了增压气体的重复利用.在天和核心舱前、后向对接机构均配置了补加接口,保证了货运飞船在天和核心舱前向对接口或后向对接口对接时,均可为天宫空间站补加推进剂,提高了任务的可靠性.另外,巡天空间望远镜等来访飞行器在前向对接口对接时,对接于后向对接口的货运飞船可借助天宫空间站过渡,为巡天空间望远镜和其他来访飞行器跨舱提供推进剂补加.

3 天宫空间站研制历程

3.1 基本研制过程

根据我国载人航天三步走的发展战略,2010年9月,中央专门委员会批准实施载人空间站工程.天宫空间站是我国首个分次发射、在轨组装建造的大型复杂航天器,其研制流程具有统筹规划、多线并举的特点.

2012年3月,天宫空间站完成了立项综合论证转入方案设计阶段,首先将空间站组合体作为一个整体进行系统方案设计,得到对各组成舱段的技术要求,然后再据此开展各舱段方案设计。2014年6月,天宫空间站结束方案设计阶段工作转入初样研制阶段,首先开展了天宫空间站系统详细方案设计,然后各舱段并行开展详细方案设计和试验测试验证工作。在初样阶段,天和核心舱通过结构热控舱和电性舱两个初样舱段分别开展力热试验验证和电性能测试验证,问天实验舱和梦天实验舱通过一个初样舱段开展了各项试验测试验证工作。天和核心舱在2019年9月首先完成初样研制转入正样研制阶段,问天实验舱和梦天实验舱分别于2020年12月和2021年4月完成初样研制转入正样研制阶段,在天宫空间站3个舱段分别转入正样研制阶段后,空间站系统也在2021年4月转入正样研制阶段。天和核心舱已于2021年4月29日发射入轨,问天实验舱与梦天实验舱正在开展正样研制与发射准备工作。

天宫空间站三舱的总装集成和测试试验主要在中国空间技术研究院天津基地超大型航天器AIT中心开展。天津超大型航天器AIT中心包括9个功能区,建筑面积近10万平方米,是世界上最大的航天器AIT中心。

3.2 大型研制试验

天宫空间站在研制过程开展的大型试验项目主要包括力学试验、热试验、三舱联试、舱段转位专项试验等,通过这些试验项目对天宫空间站方案设计进行了全面验证,为天宫空间站在轨组装建造奠定了坚实基础。

3.2.1 力学试验

天宫空间站三舱在初样阶段和正样阶段分别开展了力学试验。初样阶段力学试验项目包括静力试验、模态试验、振动试验、噪声试验等。通过试验验证了各舱结构设计承受振动环境载荷的能力,暴露舱体结构材料和制造工艺存在的缺陷,获取了舱体各部位的力学响应数据,验证并修正了舱体结构仿真分析模型。由于天宫空间站舱体结构的复杂性,为了确保验证过程的稳妥可靠,初样阶段各舱的力学试验按照先开展局部舱段试验,再开展整舱试验,循序渐进的方式进行。以天和核心舱为例,天和核心舱分为节点舱、小柱段、大柱段、资源舱和后端通道5个局部舱段。首先,5个局部舱段分别进行静力试验。然后,节点舱和小柱段组成小组合段,大柱段、资源舱和后端通道组成大组

合段,分别开展振动试验。最后,组装为整舱状态,开展模态试验、振动试验和噪声试验。

正样阶段力学试验项目包括振动试验和噪声试验,通过正样阶段力学试验进一步暴露材料、元器件和工艺等方面的缺陷,提高飞行可靠性,进一步验证工艺方案的合理性与协调性,检验整舱总装后经受振动环境条件的能力。正样阶段只开展整舱状态下的力学试验,不分局部舱段开展试验。

天宫空间站力学试验主要利用天津超大型航天器AIT中心的140 t大推力振动台和4000 m³噪声试验设备开展,相关试验设施指标居世界领先水平。

3.2.2 热试验

天宫空间站三舱在初样阶段和正样阶段分别开展了真空热试验,除了真空热试验外,天和核心舱在初样阶段还开展了常压热试验。

在初样阶段,天宫空间站各舱真空热试验验证了空间站热设计的正确性,为完善设计提供了依据,同时



图3 (网络版彩色)天和核心舱整舱振动试验
Figure 3 (Color online) Vibration test of Tianhe core module

通过试验验证修正了热仿真分析数学模型。天和核心舱在初样阶段真空热试验的基础上增加了常压热试验项目, 主要基于两方面的原因: 一是真空热试验以舱体立式方式开展, 较长的舱体轴向长度会引发显著的自然对流, 对密封舱内空气流动产生较大影响, 进而影响空气温度分布和组分分布, 因此在常压舱体水平状态下进一步开展热设计验证; 二是空间站大部分在轨时间是以组合体形式运行, 但真空热试验设施无法容纳空间站组合体开展试验, 因此在常压热试验中通过天和核心舱与模拟舱联合开展组合体热设计验证。在正样阶段, 天宫空间站各舱真空热试验验证了正样热控设计与实施的正确性, 暴露了设计、制造、材料和总装中的缺陷, 排除了早期失效, 并考核了系统在热拉偏状态下的工作能力。

天宫空间站热真空试验主要利用天津超大型航天器AIT中心的KM8空间环境模拟器开展, KM8直径为17 m, 高度为35 m, 是亚洲最大、世界第3大的空间环境模拟器。天和核心舱常压热试验则在天津大型航天器AIT中心总装测试大厅内进行。

3.2.3 三舱联试

为了验证天宫空间站三舱接口的匹配性、三舱功能融合设计以及组合体飞行方案与飞行程序的正确性, 在天和核心舱出厂前和问天实验舱出厂前各开展了一次三舱联试试验。天和核心舱出厂前的三舱联试利用天和核心舱正样舱与问天实验舱、梦天实验舱初样舱

开展, 问天实验舱出厂前的三舱联试利用问天实验舱正样舱、梦天实验舱正样舱和天和核心舱初样舱开展。测试项目包括组合体姿轨控测试、组合体能源系统测试、组合体信息系统测试、组合体热管理测试、交会对接动态测试、舱段转位动态测试和组合体典型任务动态测试。

3.2.4 舱段转位专项试验

天宫空间站舱段转位包括转位机构转位和机械臂转位两种方式, 研制阶段开展了转位机构舱段转位专项试验和机械臂舱段转位专项试验, 对转位方案进行了验证。转位机构舱段转位专项试验利用上海宇航系统工程研究所对接与转位机构全时序测试试验台开展。试验验证了舱段转位过程对接机构与转位机构配合工作时序设计的正确性, 验证了转位机构舱段转位过程分系统间接口的匹配性及信息交互的协调性。机械臂舱段转位试验在天津大型航天器AIT中心的大型超平气浮试验平台上开展, 机械臂采用气足悬浮模拟水平面内的失重状态, 采用两个模拟舱分别模拟核心舱和实验舱。试验验证了机械臂舱段转位任务协同工作程序以及转位过程分系统间接口的匹配性与信息交互的协调性。

3.3 数字化方法应用

天宫空间站任务功能的多样性和系统的复杂性为研制和运行过程带来了巨大的挑战, 为提升研制与运

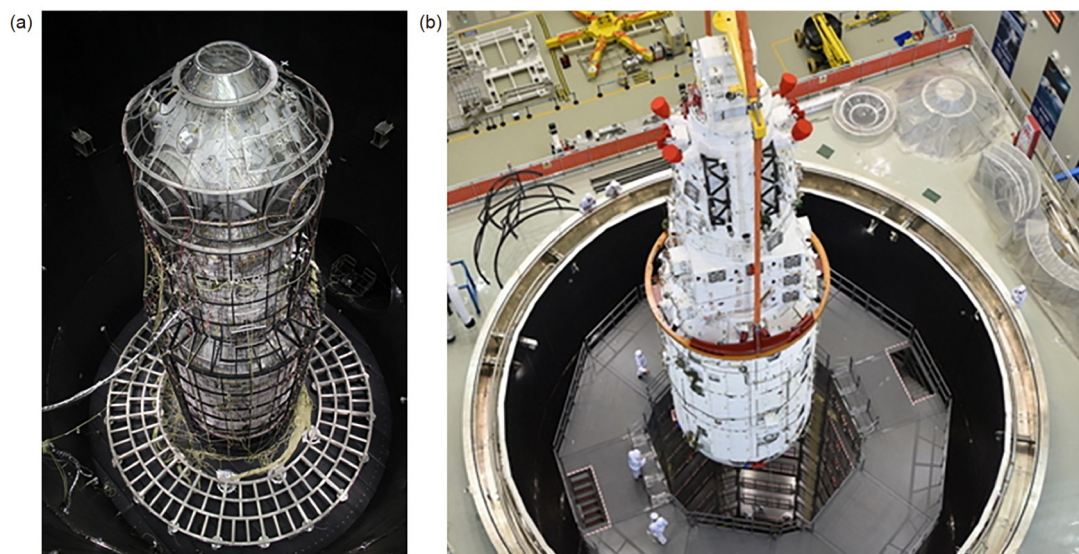


图4 (网络版彩色) 天宫空间站真空热试验。(a) 天和核心舱真空热试验; (b) 问天实验舱吊入KM8空间环境模拟器
Figure 4 (Color online) Vacuum thermal test of Tiangong space station. (a) Vacuum thermal test of Tianhe core module; (b) hoist Wentian experimental module into the KM8 space environment simulator

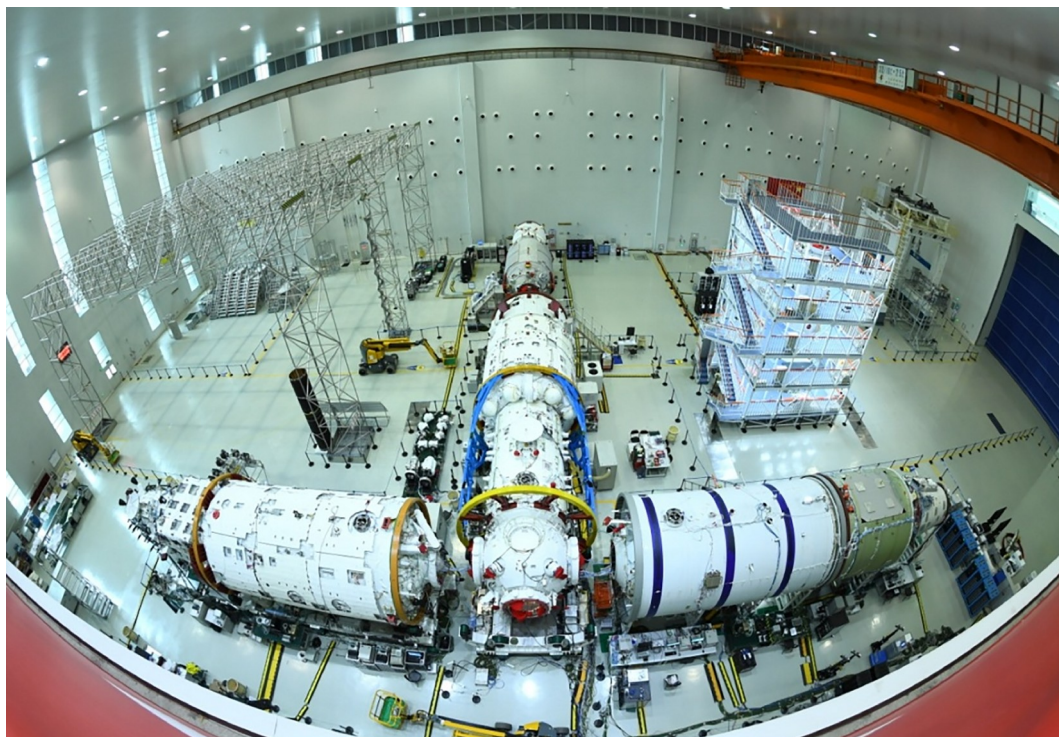


图5 (网络版彩色)天宫空间站三舱联试

Figure 5 (Color online) Three modules joint test of Tiangong space station

行的效率和质量,研制团队积极开展基于模型的系统工程方法(model based system engineering, MBSE)的探索和应用.采用Modelica多领域统一建模语言建立了包含控制与推进、能源、信息、环热控等学科专业的多学科系统仿真模型,在研制阶段用于对空间站方案设计进行综合仿真验证,在运行阶段用于在轨飞控任务仿真支持.建立了空间站全三维数字化协同设计平台,横向实现型号内跨部门、跨专业、跨地域的统一规范,并行快速协同设计,纵向实现设计、制造、总装、仿真和试验过程数据连通.基于全三维数字化协同设计平台构建了面向设计、制造、总装全过程多专业强耦合的并行协同设计体系,实现了基于统一三维模型的各专业全流程并行协同设计,研制效率大幅提升.

4 天宫空间站在轨建造进展

2021年4月29日,天和核心舱从海南文昌航天发射中心成功发射入轨,我国天宫空间站建设任务正式启动.天和核心舱入轨后先开展为期一年的在轨关键技术验证飞行,对空间站建造的各项关键技术进行在轨验证,验证结束经评估后,正式转入组装建造阶段,完

成天宫空间站三舱组合体的在轨建造.

4.1 在轨关键技术验证

天和核心舱发射入轨后,首先通过两次轨道抬升进入轨道高度约为393 km的圆轨道,然后开展平台功能在轨测试、机械臂爬行与在轨辨识测试和柔性太阳翼动力学参数在轨辨识测试.2021年5月29日,天舟二号货运飞船首次采用6 h快速交会对接模式,对接于天和核心舱后向对接口,对接后开展了推进剂补加技术验证和供电并网测试.2021年6月17日,神舟十二号载人飞船同样采用6 h快速交会对接模式,对接于天和核心舱前向对接口,空间站首批航天员乘组聂海胜、刘伯明、汤洪波进驻空间站,完成天和核心舱载人状态设置.神舟十二号航天员乘组在机械臂支持下开展了两次出舱活动,抬高了舱外全景相机,安装了扩展泵组,对空间站人机协同舱外活动技术进行了在轨验证.神舟十二号载人飞船完成3个月停靠后,于2021年9月16日与天和核心舱分离并开展径向交会在轨试验,9月17日安全返回地面.神舟十二号航天员乘组在轨驻留期间对空间站采用的物化再生生保技术进行了全面验证.神舟十二号载人飞船返回后,天舟二号货运飞船从



图 6 (网络版彩色)天宫空间站舱段转位专项试验。(a) 转位机构舱段转位专项试验; (b) 机械臂舱段转位专项试验

Figure 6 (Color online) Module transposition test of Tiangong space station. (a) Module transposition test with transposition mechanism; (b) module transposition test with robot arm

天和核心舱后向对接口绕飞至前向对接口对接停靠。

2021年9月20日,天舟三号货运飞船发射并对接于天和核心舱后向对接口,随后天和核心舱开展了霍尔电推进系统在轨测试。2021年10月16日,神舟十三号载人飞船发射并采用径向交会对接的方式停靠于天和核心舱径向对接口,航天员乘组翟志刚、王亚平、叶光富进驻空间站,在空间站上驻留6个月,进一步开展空间站关键技术验证。神舟十三号航天员乘组开展了两次出舱活动,完成了机械臂级联装置安装和舱外全景相机抬升,进一步验证了人机协同舱外活动技术。2022年4月16日,神舟十三号载人飞船与天和核心舱分离并采用5圈快速返回模式安全返回地面。

4.2 组装建造

在神舟十三号载人飞船返回后,对天宫空间站在轨关键技术验证情况进行全面评估,决策转入组装建造阶段,启动后续的三舱组合体建造工作。

在组装建造阶段,首先发射问天实验舱与天和核心舱前向交会对接,形成“一”字形两舱组合体,再利用转位机构或机械臂将问天实验舱由核心舱前向对接口转位至右侧停泊口,形成L形两舱组合体,为梦天实验舱的对接作准备。然后,发射梦天实验舱,与天和核心舱前向交会对接,形成“卜”字形三舱组合体。最后,将梦天实验舱由天和核心舱前向对接口转位至左侧停泊

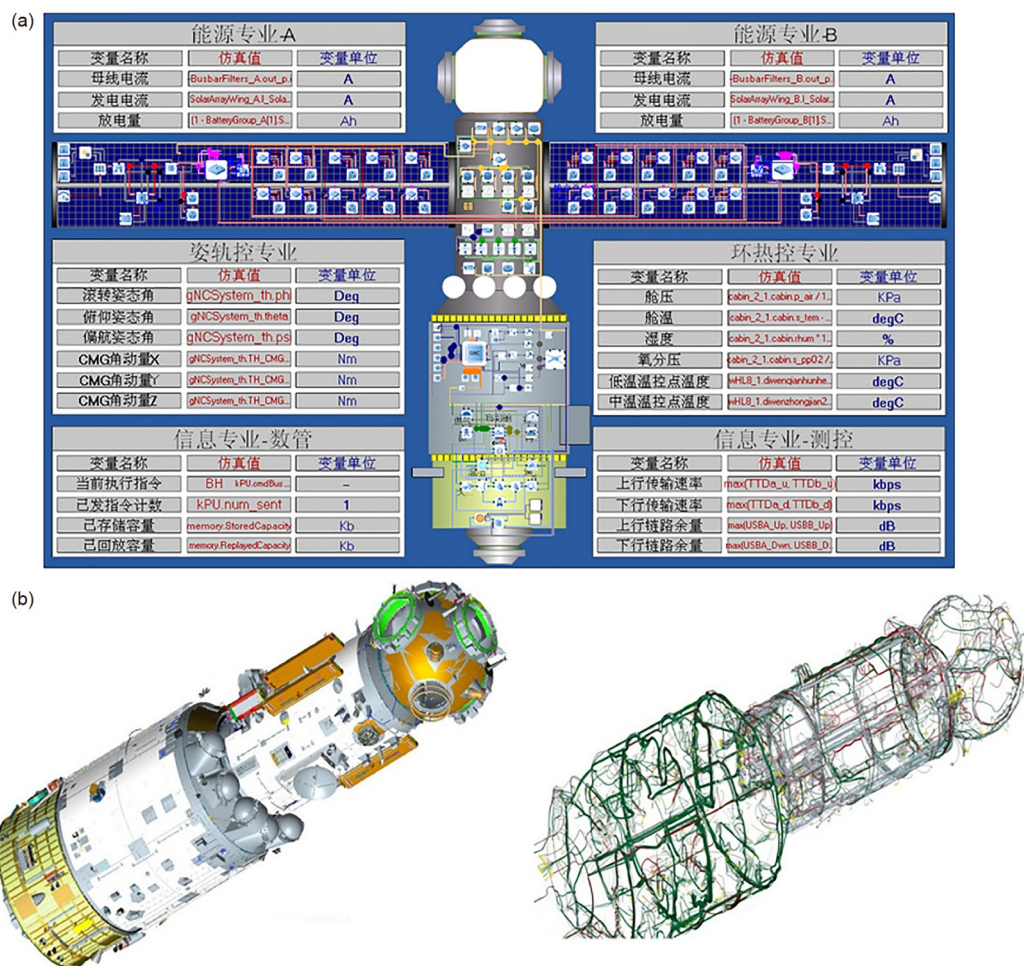


图7 (网络版彩色)天和核心舱数字模型。(a)天和核心舱多学科系统仿真模型;(b)天和核心舱三维模型

Figure 7 (Color online) Digital model of Tianhe core module. (a) Multidisciplinary system simulation model of Tianhe core module; (b) 3D model of Tianhe core module

口,完成天宫空间站三舱T字基本构型的组装建造。组装建造任务期间,发射神舟十四号、神舟十五号两艘载人飞船以及天舟四号、天舟五号两艘货运飞船,用于航天员和物资的天地往返运输。

5 天宫空间站发展展望

天宫空间站建造完成后将在轨运营10年以上,期间将通过神舟载人飞船进行航天员天地往返运输,实现航天员在空间站上的长期驻留,并通过天舟货运飞船将物资和实(试)验设备运送至空间站。天宫空间站作为国家太空实验室,将利用舱内25个实验机柜,以及舱外67个暴露载荷支持设施,持续滚动开展各类科学实验和技术试验。主要研究方向包括:航天医学、空间生命科学与生物技术、空间天文与天体物理学、微重力流体物理与燃烧科学、空间材料科学、微重力基础物

理、空间地球科学及应用、空间环境与空间物理、天基信息技术、航天元器件与部件等^[8-10]。空间站实验项目采取滚动征集、遴选和实施的机制,每2~3年按照规划进行一次项目征集。

天宫空间站运营期间将发射巡天空间望远镜与空间站共轨飞行。巡天空间望远镜是我国第一个大口径、大视场空间天文望远镜,用于巡天科学研究。巡天空间望远镜长期与天宫空间站共轨飞行,短期对接停靠,通过空间站对巡天空间望远镜进行推进剂补加和维护维修等在轨服务。这种长期共轨飞行、短期对接停靠的在轨服务运行模式是天宫空间站在运行模式上的重要创新。除了巡天空间望远镜外,未来还将可能有更多的航天器与天宫空间站共轨飞行,接受在轨服务,天宫空间站将逐渐发挥“太空母港”的重要作用^[11,12]。

天宫空间站具备良好的舱段扩展和应用支持扩展

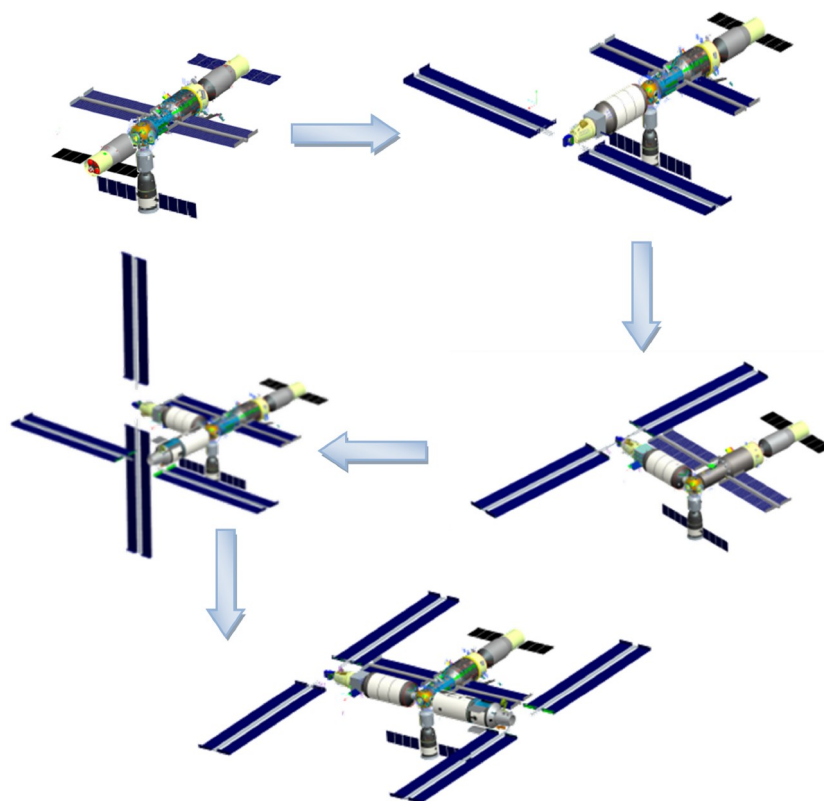


图 8 (网络版彩色)天宫空间站组装建造过程

Figure 8 (Color online) Assembly and construction process of Tiangong space station

能力, 在后续的运营阶段可根据航天员驻留能力提升、科学技术研究和国际合作等方面的需要, 开展在轨扩展建造。天宫空间站可在目前的三舱T字构型基础上, 继续对接3个新舱段形成约180 t的六舱组合体, 相应的机电热等扩展接口已预留。天和核心舱外预留一个大型载荷挂点的接口, 问天实验舱舱外预留一个扩展暴露载荷平台接口和一个大型载荷挂点接口。这些接口未来可支持暴露载荷平台等应用支持设施的扩展建造, 不断提升天宫空间站的应用支持能力。

6 结语

建造和运营空间站是我国载人航天工程三步走发展战略的重要目标, 历经十余年的研制, 天宫空间站已全面进入在轨组装建造任务实施阶段。建造完成后, 还将开展10年以上的长期在轨运营。天宫空间站将作为我国国家级太空实验室和国际科技合作交流平台, 推动我国载人航天能力跻身世界前列, 牵引我国空间科学与技术的深入发展。

参考文献

- 1 Zhou J P. Chinese space station project overall vision (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2013, 19: 1–10 [周建平. 我国空间站工程总体构想. 载人航天, 2013, 19: 1–10]
- 2 Yang H. The “Tiangong” Chinese Space Station project. *Front Eng Manag*, 2018, 5: 278–283
- 3 China Manned Space Engineering Office. Development of Space Station Engineering (in Chinese). Technical Report. Beijing: China Manned Space Engineering Office, 2016 [中国载人航天办公室. 空间站工程研制进展. 科技报告. 北京: 中国载人航天办公室, 2016]
- 4 Fan W N. Study on system characteristics of International Space Station (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2012, 21: 94–100 [范嵬娜. 国际空间站系统特点分析. 航天器工程, 2012, 21: 94–100]
- 5 Wang X, Wang W. Key technical characteristics of the Tiangong space station (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1287–1298 [王翔, 王为. 天宫空间站关键技术特点综述. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1287–1298]

- 6 Li D M, Rao W, Hu C W, et al. Key technology review of the research on the space station manipulator (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2014, 20: 238–242 [李大明, 饶伟, 胡成威, 等. 空间站机械臂关键技术研究. *载人航天*, 2014, 20: 238–242]
- 7 Wu Z Q, Gao F, Deng Y B, et al. Key technology review of research on regenerative environmental control and life support system for space station (in Chinese). *Space Med Med Eng*, 2018, 31: 105–111 [吴志强, 高峰, 邓一兵, 等. 空间站再生生保关键技术研究. *航天医学与医学工程*, 2018, 31: 105–111]
- 8 Gao M, Zhao G H, Gu Y D. Space science and application mission in China's space station (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2015, 30: 721–732 [高铭, 赵光恒, 顾逸东. 我国空间站的空间科学与应用任务. *中国科学院院刊*, 2015, 30: 721–732]
- 9 Su H P, Zhao Z H, Sun Y J, et al. Study on space science and technology of manned space station (in Chinese). *J Astron*, 2014, 35: 985–991 [苏怀朋, 赵振昊, 孙永进, 等. 载人空间站空间科学应用研究. *宇航学报*, 2014, 35: 985–991]
- 10 Yang H, Zhang Q. Introduce to Manned Environment and Scientific Experimental Resources of China Space Station. In: *The 69th International Astronautical Congress*, Bremen, 2018
- 11 Yan H J, Jin Y Q, Wei X Q, et al. Analysis of on-orbit servicing technique demonstrations on international space station and developments (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 47: 185–199 [闫海江, 靳永强, 魏祥泉, 等. 国际空间站在轨服务技术验证发展分析. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48: 185–199]
- 12 Wang T M, Wang H, Li H Y. Research on location deployment of space station co-orbital spacecraft for refueling mission (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2017, 23: 582–596 [王天梦, 王华, 李海阳. 面向补给任务的空间站共轨飞行器部署研究. *载人航天*, 2017, 23: 582–596]

Summary for “我国天宫空间站研制及建造进展”

Development and construction progress of the Tiangong space station in China

Xiang Wang & Wei Wang^{*}

Beijing Spacecraft System Engineering Institute, Beijing 100094, China

^{*} Corresponding author, E-mail: wei99_w@163.com

China's Tiangong space station is the world's third on-orbit assembly multi-module space station. It has appropriate scale and function conforming to China's national conditions and prominent Chinese elements. After completion, it will become China's space home and national space laboratory.

This paper first introduces the overall scheme and key technologies of the Tiangong space station. The Tiangong space station comprises three modules: The Tianhe core module and the Wentian and Mengtian experimental modules, which are in a T-shaped configuration. The Tianhe core module is in the middle, and the Wentian and Mengtian experimental modules are connected on both sides. The Tiangong space station is equipped with forward, backward, and radial interfaces. The forward interface is mainly used for docking manned spacecraft and the Xuntian space telescope, the backward interface is mainly used for docking cargo spacecraft, and the radial interface is mainly used for docking manned spacecraft. On the basis of the technology in the early stage of China's manned spaceflight project, the Tiangong space station has made breakthroughs in key technologies, such as space robot arms, high-efficiency power supply systems, physicochemical regeneration life-support systems, and on-orbit propellant supplement systems.

The Tiangong space station is China's first large complex spacecraft launched separately and assembled in orbit. Its development process has the characteristics of overall planning and multi-line development. The assembly, integration, and testing of the three modules of the Tiangong space station are mainly conducted in the super large spacecraft AIT center of the China Academy of Space Technology in Tianjin. The main test projects conducted while developing the Tiangong space station mainly include mechanical testing, thermal testing, three-module joint testing, and module transposition testing. Through these test projects, the Tiangong space station design has been comprehensively verified, laying a solid foundation for the on-orbit assembly and construction of the Tiangong space station.

On April 29, 2021, the Tianhe core module was successfully launched into orbit from the Wenchang space launch center in Hainan, and the task of constructing China's Tiangong space station officially started. After the Tianhe core module was launched into orbit, a 1-year in-orbit key technology verification flight was conducted to verify the key technologies of the space station construction. After the verification, it was officially transferred to the assembly and construction stage to complete the in-orbit construction of the Tiangong space station with three modules.

Once constructed, the Tiangong space station will operate in orbit for more than ten years. During this period, various scientific experiments and technical tests will be continuously conducted using the experiment support facilities inside and outside the cabin. During the operation of the Tiangong space station, the Xuntian space telescope will be launched to fly in common orbit with the space station, and the space telescope will be provided with on-orbit services such as propellant replenishment, maintenance, and repair through the space station. In the future, more spacecraft may fly in common orbit with the Tiangong space station to receive on-orbit services. The current T-shaped three-module assembly configuration of the Tiangong space station has a good capacity for module expansion and application support expansion. It has the expansion capacity of docking three new modules to form a six-module assembly of approximately 180 tons.

Tiangong space station, system scheme, development test, assembly and construction, development prospect

doi: [10.1360/TB-2022-0499](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0499)