天宫空间站关键技术特点综述

王翔, 王为*

北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* E-mail: wei99_w@163.com

收稿日期: 2021-07-20; 接受日期: 2021-08-17; 网络版发表日期: 2021-10-27

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 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, 天宫空间站任务定位是国家级太空实验室和国际科技合作交流平台, 由天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱三个舱段组成. 本文介绍了天宫空间站系统方案, 以国外和平号空间站和国际空间站为参照, 对天宫空间站的关键技术特点进行了分析, 总结了天宫空间站在系统集成设计优化、新技术比重大、费效比高、注重航天员安全和高效工作、扩展空间大等方面的技术特点, 体现了天宫空间站的技术成就与创新点.

关键词 空间站, 载人航天, 系统方案, 技术特点

1 引言

2021年4月29日, 我国天宫空间站天和核心舱从海南文昌航天发射中心成功发射入轨, 标志着我国空间站工程进入任务实施阶段, 载人航天空间站时代的大幕已开启. 建造空间站是我国载人航天工程三步走发展战略的最终目标, 三步走发展战略分别是: 第一步, 发射载人飞船, 建成初步配套的试验性载人飞船工程, 开展空间应用实验; 第二步, 突破航天员出舱活动技术、空间飞行器的交会对接技术, 发射空间实验室, 解决有一定规模的、短期有人照料的空间应用问题; 第三步, 建造空间站, 解决较大规模的、长期有人照料的空间应用问题^[1].

从国际载人航天发展历程来看, 自1971年苏联发射礼炮一号试验性空间站起, 到国际空间站的建造与运营, 再到我国天宫空间站启动建设的五十年间, 载人航天领域唯一没有间断的活动, 就是空间站的建设

和应用. 天宫空间站作为世界上第三座多舱段在轨组装建造空间站, 在系统设计上充分借鉴了和平号空间站和国际空间站的经验教训, 坚持立足我国基本国情, 秉持规模适度、安全可靠、技术先进、经济高效的观念, 充分利用现有条件, 着力发挥后发优势, 走出一条创新型跨越式发展道路.

本文重点从系统设计、新技术应用、费效比、航天员支持、扩展能力等方面对天宫空间站关键技术特点进行分析总结, 有助于更好地理解天宫空间站的技术成就与创新点, 为后续空间站的在轨组装建造和长期运营工作提供参考和借鉴.

2 系统方案

2.1 任务定位

天宫空间站任务定位是国家级太空实验室和国际科技合作交流平台, 战略目标是: 建成和运营近地载人

引用格式: 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

Wang X, Wang W. Key technical characteristics of the Tiangong Space Station (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1287–1298, doi: 10.1360/SST-2021-0304

空间站,使中国成为独立掌握近地空间长期载人飞行技术,具备长期开展近地空间有人参与科学技术实(试)验能力,能够综合开发利用太空资源的国家^[2].通过天宫空间站的建设,我国将在特殊的太空环境中搭建起有人参与的科学探索与技术创新国家级太空实验室,航天员和科学家将经常往来于天地之间,开展大规模的空间科学实验和技术试验,进一步推动我国创新型国家建设,显著提升我国在国际科学技术领域的影响力.

天宫空间站的具体任务要求包括以下三点.

- (1) 建造以天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱为基本构型,长期在轨可靠运行的空间站.
- (2) 为航天员长期在轨健康生活、有效工作提供保障,并在其他系统配合下,保证访问空间站航天员的安全.
- (3) 为开展多领域空间科学实验与技术试验提供保障和支持条件.

2.2 系统组成

天宫空间站由天和核心舱、问天实验舱和梦天实验舱三个舱段组成,呈T字构型,天和核心舱居中,问天实验舱和梦天实验分别连接于两侧,如图1所示.天宫空间站设置有前向、后向和径向三个对接口,前向

对接口主要用于对接载人飞船和巡天空间望远镜,后向对接口主要用于对接货运飞船,径向对接口主要用于对接载人飞船.

天宫空间站以三舱构成完整系统统一设计,各舱段的基本情况分别如下.

(1) 天和核心舱

天和核心舱包括节点舱、生活控制舱(含小柱段、大柱段和后端通道)及资源舱三部分,轴向总长16.6 m,最大直径4.2 m,如图2所示.节点舱用于舱段连接和飞行器访问,提供1个前向对接口、1个径向对接口和2个侧向停泊口,兼做航天员出舱活动气闸舱,上方设置出舱活动口.生活控制舱小柱段内设置航天员睡眠区和卫生区,舱外配置大机械臂,两侧安装单自由度太阳能电池翼及其驱动机构.资源舱后端配置对接口和物资补给通道.

天和核心舱主要任务是空间站平台的统一管理和控制,并作为目标飞行器支持来访飞行器交会对接、转位与停泊.天和核心舱在载人飞船和货运飞船的支持下,支持乘组长期驻留,为航天员在轨工作和生活提供保障条件,保证航天员安全.提供出舱活动气闸功能,支持航天员出舱,支持开展密封舱内空间科学实验和技术试验.

图1 (网络版彩图)天宫空间站舱段组成

Figure 1 (Color online) The modules of the Tiangong Space Station.

(2) 问天实验舱

问天实验舱包括工作舱、气闸舱、资源舱三部分, 舱体轴向长度为17.9 m, 舱体最大直径4.2 m, 如图3所示. 配置小机械臂, 在气闸舱和资源舱外布设舱外实验平台, 用于安装舱外实(试)验载荷. 尾部采用桁架结构, 安装双自由度太阳池翼及其驱动机构.

问天实验舱主要任务是在轨完成与天和核心舱交会对接、舱段转位和停泊, 并作为天和核心舱能源管理系统、信息管理系统、控制系统和载人环境系统等关键平台功能的备份, 具备对组合体进行统一管理与控制的能力. 保障航天员在轨长期驻留, 提供专用气闸舱和应急避难场所, 保证航天员安全. 为开展密封舱内和舱外空间科学实验和技术试验提供保障条件.

(3) 梦天实验舱

梦天实验舱包括工作舱、货物气闸舱、载荷舱、资源舱四部分, 舱体轴向长度为17.9 m, 最大直径4.2 m, 如图4所示. 载荷舱外设置展开式载荷实验平台, 发射后在轨展开, 资源舱与问天实验舱基本相同.

梦天实验舱主要任务是在轨完成与天和核心舱交会对接、舱段转位和停泊, 为航天员在密封舱内工作提供保障条件, 保证航天员安全. 为开展舱内及舱外空间实(试)验提供保障条件, 提供货物气闸, 实现载荷与设备自动进出舱.

2.3 组装建造过程

天宫空间站三舱基本构型采用空间交会对接和在轨舱段转位的方式完成建造, 如图5所示, 组装建造过程如下:

第一步: 发射天和核心舱, 进行空间站组装建造关键技术轨上验证;

第二步: 发射问天实验舱, 与天和核心舱前向对接口交会对接, 形成“一”字形两舱组合体;

第三步: 在梦天实验舱发射前, 将问天实验舱由天和核心舱前向对接口在轨转位至右侧停泊口, 形成L形两舱组合体;

第四步: 发射梦天实验舱, 与天和核心舱前向对接

图 2 (网络版彩图)天和核心舱构型

Figure 2 (Color online) The configuration of Tianhe core module.

图 3 (网络版彩图)问天实验舱构型

Figure 3 (Color online) The configuration of WenTian experimental module.

图 4 (网络版彩图)梦天实验舱构型
Figure 4 (Color online) The configuration of Mengtian experimental module.

图 5 (网络版彩图)天宫空间站组装建造过程
Figure 5 (Color online) The process of assembling and building of Tiangong Space Station.

口交会对接, 形成“卜”字形三舱组合体;
第五步: 将梦天实验舱由天和核心舱前向对接口在轨转位至左侧停泊口, 形成T形三舱组合体, 完成天宫空间站基本构型建造。

3 技术特点分析

天宫空间站在技术方案上注重系统层设计, 多舱段组合体采用一体化方式设计, 各舱段统一分配功能与技术指标, 并充分利用舱段组合后功能融合与系统重构的方法, 在有限规模的条件下提高系统安全性、可靠性与资源利用效率, 总体上体现了中国特色和技

术进步。作为参照, 本节首先对和平号空间站和国际空间站的技术特点进行简要分析, 然后再对天宫空间站进行技术特点分析。

3.1 国外空间站技术特点分析

空间站作为人类开展太空探索的前哨阵地, 至今已经历五十年的发展历程。空间站在空间科学研究、技术试验验证等推动人类文明进步的诸多方面发挥了显著的作用。空间站的发展经历了两个发展阶段。

第一阶段(1971~1985年), 建造和运行单舱空间实验室和空间站。该阶段开展了作为空间站应用主要任务的各科学技术领域的在轨研究工作, 明确了空间站

应用的方向和范畴。

第二阶段(1986年至今), 建造和运行多舱段的和平号空间站和国际空间站。这一阶段通过多舱空间站的建造和应用实践, 使空间站从试验型应用转化为业务型应用。

本文重点对上述第二阶段的和平号空间站和国际空间站两座多舱段空间站的技术特点进行分析。

3.1.1 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, 2001年整站受控离轨, 共在轨运行15年。如图6所示, 该空间站为多模块积木式构型, 由核心舱、量子一号舱、量子二号舱、晶体舱、光谱舱和自然舱6个舱段组成, 是世界上第一个多舱段空间站, 采用分期发射、在轨装配、逐步扩展的方式建造, 其内部空间与单舱空间站相比大大扩展, 应用能力显著提升, 服役期间产生了大量科学技术研究成果。

总结和平号空间站建造和运行的经验教训, 其主

要存在如下两方面问题。

(1) 由于缺乏系统规划, 和平号空间站的多模块积木式构型存在空间不协调问题, 每个舱段都有面积较大的太阳能电池阵, 但由于彼此相互遮挡, 大大降低了电能的输出, 直接影响了空间站的正常运转、有效使用和航天员的生活。

(2) 和平号空间站的初始设计寿命为5年, 最后在轨运行了15年, 其对设备的固有可靠性和维修维护考虑不足, 导致运行后期航天员80%的时间用于在轨维修, 消耗了宝贵的航天员在轨工作时间资源, 限制了空间站效能的发挥。

3.1.2 国际空间站

国际空间站是目前人类建造的规模最大的空间飞行器, 从1998年开始建造至2011年完成建造, 建造过程耗时14年。目前国际空间站正在轨运行, 原定于2020年退役, 目前计划延期至2024年。国际空间站总重约423 t, 可供6~7名航天员长期在轨工作生活, 包括6个

图6 (网络版彩图)和平号空间站构型(<https://news.itmo.ru/en/education/trend/news/9598/>)

Figure 6 (Color online) The configuration of Mir Space Station (<https://news.itmo.ru/en/education/trend/news/9598/>).

实验舱、1个居住舱、3个节点舱,如图7所示。国际空间站整体构型主要由两大部分立体交叉组合而成:一部分以俄罗斯的多功能货舱为基础,通过节点舱与俄罗斯的服务舱、研究舱和生命保障舱,美国的实验舱和居住舱,日本的实验舱以及欧洲的实验舱对接,形成国际空间站的核心部分。另一部分由美国的桁架结构、加拿大移动服务系统、舱外仪器设备和4对大型太阳能电池翼组成,作为站上的能源及服务部分^[3]。

从国际空间站前期的建造和运行情况来看,主要存在如下两方面问题。

(1) 国际空间站的美国部分和俄罗斯部分技术体制存在较大差异,使得各部分之间无法充分融合,影响整站效能的最大化。例如由于运行体制不同,美国部分和俄罗斯部分的热控系统彼此独立,无法实现各部分之间散热能力的灵活调配。

(2) 国际空间站系统过于庞大复杂,建造过程共耗时14年,严重限制了其效益发挥。且运营维护代价巨大,给参与国带来了沉重的资金负担,运营效益相对

其投入效果不显著。

3.2 天宫空间站技术特点分析

总体来看天宫空间站技术特点主要体现在系统集成设计优化、新技术比重大、费效比高、注重航天员安全和高效工作、扩展空间大等方面。

3.2.1 注重系统级集成设计,追求整体最优

天宫空间站整体构型设计借鉴了和平号空间站“积木组装”式的构型特点,但为了避免和平号空间站各舱段间太阳能电池翼遮挡严重的问题,天宫空间站主要进行了两方面的改进:一是各舱段布局于同一平面内,减少舱段间的舱体相互遮挡;二是借鉴了国际空间站通过桁架将太阳能电池翼布局于两侧以减少遮挡的设计,通过两个实验舱对置,利用单舱近20 m长的主结构及舱段尾部小桁架,将实验舱大面积太阳能电池翼布局于整体构型的两侧,同时配置双自由度驱动机构,使太阳能电池翼能够随时与太阳光线垂直,保证发电效

图7 (网络版彩图)国际空间站构型(<https://www.nasa.gov/image-feature/international-space-station>)

Figure 7 (Color online) The configuration of International Space Station (<https://www.nasa.gov/image-feature/international-space-station>).

率保持在最高状态。

天宫空间站充分发挥了由我国一国独立研制的优势,在系统层面进行了高度的一体化设计,避免了国际空间站由不同国家联合研制带来的技术体制不统一、整体优化程度不高的问题。统一且合理分配三舱的功能,由天和核心舱负责空间站平台的统一管理和控制,问天实验舱对能源管理、信息管理、控制系统和载人环境等关键平台功能进行冗余备份,梦天实验舱进一步提供重要功能的设备级备份,确保平台安全。三舱采用统一的技术体制,构型结构、能源系统、信息系统、环热控系统等均统一设计,在形成组合体后三舱的各系统均能互联互通,形成一个有机的整体。同时整站充分利用了快速发展的先进信息技术,实现了舱段间高效的系统融合和重构,提高了空间站整体能力和系统可靠性。此外天宫空间站与神舟载人飞船和天舟货运飞船的技术体系也保持一致,使得神舟载人飞船和天舟货运飞船与天宫空间站对接后也能构成有机整体,参与组合体的管理。例如天宫空间站的计算机可控制天舟货运飞船的发动机进行组合体轨道和姿态控制。

在运行模式方面,天宫空间站创新设计了共轨飞行航天器在轨服务模式,充分利用其长期有人驻留、配置空间机械臂的优势,为来访航天器提供在轨维修服务,并能将天舟货运飞船携带的推进剂过路补加至来访航天器。巡天空间望远镜将作为第一个接受天宫空间站在轨服务的共轨飞行航天器,在天宫空间站建造完成后发射入轨,如图8所示。相较美国“哈勃”空间望远镜每一次维修都需要发射航天飞机的情况,这种共轨飞行服务模式在经济性方面有着巨大优势,也有利于后续在轨进行技术升级^[4,5]。

3.2.2 跨越式发展,新技术比重大

在空间站技术发展上俄罗斯采取了慎重稳妥和循序渐进的方式,最大限度地利用了成熟技术。首先陆续

图8 (网络版彩图)巡天空间望远镜
Figure 8 (Color online) Xuntian space telescope.

发射5个礼炮号空间实验室,用于试验空间站的相关技术,取得一定经验后发射2个单舱段式礼炮号实用空间站,在此基础上最终建造出多模块积木式长久性空间站——和平号。美国的空间站发展过于注重先进性而缺乏连续性和继承性。美国至今只独立发射过1个单舱段空间实验室“天空实验室”,其自主研发的自由号空间站因为技术跨度太大而中途夭折,最终演变成大量应用了俄罗斯技术且多国联合研制的国际空间站。此外,国际空间站的建造非常依赖航天飞机的强大运输及在轨操作能力,航天飞机的退役对其后续发展影响很大。

我国则是在经过空间实验室阶段任务、突破了交会对接等关键技术的基础上,经充分地面试验验证,引入新技术进行天宫空间站的建造,走出了一条稳健的跨越式发展道路。新技术比重大是天宫空间站的显著特征,其采用的空间机械臂技术、物化式再生保技术、大面积柔性太阳翼技术等均为我国首次在轨开展应用的全新技术,应用难度大,风险高。

在空间机械臂技术方面,天宫空间站分别在天和核心舱和问天实验舱配置大小两个机械臂来完成相应的在轨操作任务,大机械臂实现大范围转移和大负载操作,小机械臂实现高精度操作^[6],图9为大机械臂在轨飞行状态图像。大小机械臂可通过在轨级联组合使用,提升操作范围和精确度,相较国际空间站主要采用单一机械臂进行在轨操作的设计,具有更大的任务灵活性。在物化再生保技术方面,配置了解制氧装置、CO₂去除子系统、微量有害气体净化子系统、冷凝水处理子系统、尿处理子系统等,实现高物质闭环度的载人环境控制^[7],资源再生利用水平与国际空间站相当。电源系统采用大面积柔性电池翼提供能源,电池片为转换效率30%以上的三结砷化镓电池片,采用锂离子电池储能,问天和梦天实验舱配置双自由度太阳电池翼驱动机构实现对日定向,并三舱统一调配供电,图10为核心舱太阳翼在轨状态图像。与国际空间站相比天宫空间站电源系统太阳能转换效率更高,不需要采用大型桁架安装,结构更为紧凑。

新技术比重大也是天宫空间站充分利用后发优势实现技术进步的具体体现。得益于近年来信息技术的飞速发展,天宫空间站充分利用先进信息技术提升平台能力。基于我国第二代中继卫星的天地测控通信系统传输速率达到1.2 Gbps,为国际空间站的2倍。

图9 (网络版彩图)天宫空间站大机械臂

Figure 9 (Color online) The big manipulator of Tiangong Space Station.

图10 (网络版彩图)柔性太阳能电池翼在轨展开

Figure 10 (Color online) The flexible solar cell wings deployed in orbit.

为应用载荷直接提供以太网作为服务系统,既能满足载荷数据传输的高性能要求,又为地面技术向在轨航天器移植提供了极大的便利。

针对新技术应用带来的在轨飞行任务风险,天宫空间站在天和核心舱发射入轨后专门设置了约1年时间的关键技术在轨验证飞行阶段,在神舟载人飞船和天舟货运飞船的配合下,利用天和核心舱对后续空间站组装建造的关键技术进行全方位在轨验证,特别是对存在较大天地差异、无法通过地面测试试验全面验证的关键技术进行在轨验证。经关键技术在轨验证通过后,再决策实施后续天宫空间站的正式组装建造任务,确保组装建造工作可靠开展。

3.2.3 规模适度,费效比高

天宫空间站三舱质量约为69 t,虽然与123 t的和平号空间站、423 t的国际空间站相比,规模相对较小,但从建造成本和应用效益的角度综合分析,这是一个符

合我国国情和实际需要的理性选择。天宫空间站通过整体统一优化设计,建成后在控制、信息、能源、资源再生利用、物资补给需求、运营成本、应用效益等方面均将达到当代国际先进水平,并在一些方面有所超越,在建造和运营上更为经济合理。

(1) 发电效能

天宫空间站能源系统在载荷支持功率占比和单位质量功率密度方面达到国际先进水平。国际空间站110 kW的发电功率中提供给有效载荷的功率为50 kW,占总功率的45%;天宫空间站供电指标为27 kW,提供给有效载荷的功率为17 kW,占总功率的63%。同时,天宫空间站功率重量比为0.41 kW/t,超过了国际空间站0.26 kW/t的功率重量比指标。

(2) 应用支持能力

天宫空间站舱内实(试)验支持设施与国际空间站类似,采用标准化机、电、热、信息保障条件,可开展空间生命科学与生物技术、微重力基础物理、空间材料科学等领域的科学实验和技术试验。天宫空间站站上共安装实验机柜25个,国际空间站安装实验机柜31个,天宫空间站以约国际空间站1/6的重量,提供了约4/5的实验机柜数量,体现了很高应用支持效率^[8~11]。

天宫空间站具有很强的舱外应用载荷支持能力。比较来看和平号空间站未设置单独的舱外实验平台,国际空间站在日本希望号实验舱设置了舱外实验平台,可支持12个暴露应用载荷。天宫空间站则设置了固定式和展开式暴露平台,可支持67个暴露应用载荷,如图11所示。此外为保障舱外应用载荷工作,天宫空间站还配置了用于载荷照料的机械臂和专用的载荷自动进出气闸舱装置,大大提高了舱外应用载荷操作效率。

除了上述常规的应用支持能力外,天宫空间站还具备高水平的在轨服务能力,可支持未来有人参与的空间设施在轨组装建造应用^[12,13]。另外天宫空间站也可作为未来载人深空探测关键技术的先期验证平台,通过现有应用载荷支持设施或者扩展建设专用的支持设施,开展相关关键技术在轨验证,有效降低载人深空探测任务实施技术风险。

(3) 建造方式

国外空间站建造主要采取两种方式:一是以和平号空间站为代表,由运载火箭将舱段送入轨道,各舱段直接交会对接和在轨转位完成组装,其建造过程简单、成本较低。二是以国际空间站为代表,由航天飞

图 11 (网络版彩图)固定式和展开式暴露平台

Figure 11 (Color online) The fixed and expandable exposed platforms.

机携带舱段入轨,大型机械臂与航天员出舱协作组装,建造过程灵活,但成本和操作风险较高.天宫空间站建造方式则更为优化,综合运用了上述两种方式,采用舱段直接交会对接和在轨转位等方式进行舱段组装,完成基本构型与功能集成.同时通过大型机械臂操作和航天员出舱活动,进行柔性太阳能电池翼在舱段间的转移安装,实现性能扩展和优化.

(4) 补给需求

和平号空间站长期驻留3人,年均补给2艘载人飞船,4艘货运飞船,物资总质量16 t.国际空间站长期驻留6人,年均补给4艘载人飞船,8艘货运飞船,补给物资质量约30~40 t.天宫空间站运营期间将长期驻留3人,年均补给约2艘载人飞船和2艘货运飞船,补给物资质量约12 t.天宫空间站通过采用再生式生命保障技术等降低物资补给需求的优化设计手段,总体看运行补给需求规模适中,与其整体规模和能力相适应,体现了较高的经济性.

此外天宫空间站在天和核心舱尾部配置霍尔电推进系统,用于空间站轨道维持,作为化学推进系统的补充.这是世界上首次在空间站上应用电推进系统,有利于降低空间站运营期间对推进剂的补给需求.

3.2.4 以人为本,工作生活安全高效

天宫空间站研制坚持以人为本的理念,一方面确保航天员在轨驻留的安全舒适,另一方面注重支持航天员主观能动性的有效发挥,充分体现人在空间站建造和运营中的独特作用.

在驻留安全性方面天宫空间站结合多舱段多航天器特点,充分利用系统重构和冗余设计,按照“一次故

障工作,二次故障安全”的原则,确保航天员在轨安全.正常情况下天和核心舱作为空间站平台控制管理中心,对整站进行统一控制.在天和核心舱出现故障的情况下,可通过舱段重构将天和核心舱的控制管理功能转移至问天实验舱,确保单舱段故障情况下整站仍然安全可靠.问天实验舱配置有一套完整的再生式生命保障系统和应急物资,在天和核心舱出现失火、失压等故障情况下,航天员可在问天实验舱长时间等待地面故障处置和救援.在航天员出舱活动安全性方面,天宫空间站除问天实验舱配置的主份气闸舱外,还将天和核心舱节点舱作为备份气闸舱,如图12所示.在出舱过程中如果主份气闸舱出现问题,航天员能通过节点舱进入舱内,保证出舱活动的安全可靠.

在宜居性方面天宫空间站舱内根据宜居的设计理念,分别设置了生活区和工作区.生活区有独立的睡眠区、卫生区、锻炼区,还配置有太空厨房和就餐区,在设计上最大程度考虑到航天员居住的私密性和便利性,提高航天员太空生活质量.同时,充分利用地面成功应用的新技术提高航天员生活和工作的便捷性和舒适性.在舱内外设置无线WiFi网络,设计了舱内航天员工作、生活、娱乐APP,通过智能手机、平板电脑控制实现空间站智能家居管理、智能物资管理和天地网络通话,图13为航天员天地通话图像.设计了太空跑台锻炼区和太空自行车锻炼区两个锻炼区,用于航天员在轨日常锻炼,同时配置锻炼设备包和微重力抗阻锻炼装置,用于增加锻炼方式的多样性,辅助日常锻炼,为航天员心理和生理健康提供保障.

为支持航天员在轨高效工作,充分发挥载人空间站建造和运营中人的独特作用,天宫空间站在支持航

图 12 (网络版彩图)航天员出舱场景. (a) 航天员从节点舱出舱; (b) 航天员从气闸舱出舱

Figure 12 (Color online) EVA training. (a) An astronaut getting out of the space station node; (b) an astronaut starting a spacewalk from the airlock module.

图 13 (网络版彩图)航天员天地通话

Figure 13 (Color online) Astronauts are talking between the sky and the earth.

航天员在轨操作方面开展了大量的设计工作。例如为支持航天员与机械臂的高效人机协同工作,在天和核心舱内配置了机械臂操作台,可由航天员操控机械臂完成出舱活动作业点调整、在轨巡检等任务。为支持航天员进行设备在轨维修操作,一方面天宫空间站可维修更换的设备均根据航天员在轨操作的工效学要求进行了专门的设计,另一方面配置了功能完备的在轨维修工具,助力航天员完成维修任务。在支持航天员舱

外活动方面,天宫空间站从通信、照明、图像、助力设施、指示标识等方面进行了全方位的综合优化设计,保障舱外活动的安全高效开展。

3.2.5 着眼未来,扩展空间大

天宫空间站建造完成后将在轨运营10年以上,需具备良好的舱段扩展和应用支持扩展能力,根据空间科学技术研究、空间应用和国际合作的需要,灵活进

行扩展. 天宫空间站在方案设计阶段即对未来的扩展方案进行了统筹考虑. 在现有三舱构型基础上, 预留了机、电、热等扩展接口, 具备扩展对接3个新舱段形成约180 t六舱组合体的扩展能力, 如图14所示.

天和核心舱在大柱段舱外预留1个大型载荷挂点的接口, 支持在轨安装大型载荷. 问天实验舱舱外预留1个扩展暴露载荷平台接口和1个大型载荷挂点接口, 支持在轨安装扩展暴露载荷平台和大型挂接载荷.

在扩展建造方式方面, 扩展舱段一般应具备独立飞行以及与天宫空间站交会对接的能力, 扩展暴露平台等其他扩展设施则可通过半开放或全开放式天舟货运飞船上行空间站安装. 天宫空间站配置的机械臂也为扩展建造提供了有利条件, 可实现扩展舱段、扩展暴露载荷平台等扩展设施的灵活转移和组装.

图 14 (网络版彩图)空间站六舱扩展组合体构型示意图
Figure 14 (Color online) The schematic diagram of the six-cabin configuration of the space station.

4 结束语

天宫空间站充分继承我国载人航天工程前期的研制技术基础, 汲取国际上已有空间站的经验教训, 立足我国基本国情并跨越式创新发展, 注重系统级设计及优化, 大胆采用多项新技术提升整体性能, 并注重航天员能动性的充分发挥, 具有鲜明的中国特色. 目前

天和核心舱已成功发射入轨并开展关键技术轨验证, 待关键技术验证完成后将启动两个实验舱的发射及空间站在轨组装建造. 未来天宫空间站作为我国国家级太空实验室将在轨运行10年以上, 实现中国人在太空的长期连续驻留, 并有望在空间科学技术方面取得突破性进展, 不断拓展人类探索太空的广度和深度.

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 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. 技术报告. 北京: 中国载人航天办公室, 2016]
- 3 Fan W N. Study on system characteristics of International Space Station (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2012, 21: 94–100 [范鬼娜. 国际空间站系统特点分析. 航天器工程, 2012, 21: 94–100]
- 4 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, 48: 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]
- 5 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]
- 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 Fan W W, Han L, Yang F, et al. Review of scientific research and application on ISS in 2018 (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2019, 25: 271–276 [范唯唯, 韩淋, 杨帆, 等. 2018年国际空间站科研与应用进展. *载人航天*, 2019, 25: 271–276]
- 10 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]
- 11 Fan W W, Yang F, Han L. Review of 20 years research activities and future elements in russian segment on ISS (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2018, 24: 553–560 [范唯唯, 杨帆, 韩淋, 等. 国际空间站俄罗斯舱段20年主要科研活动及未来部署综述. *载人航天*, 2018, 24: 553–560]
- 12 Liu J G, Chen K L, Xie H L. Preliminary design and analysis of space station inflatable deployable extravehicular payload prototype (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2016, 22: 737–743 [刘金国, 陈科利, 谢华龙. 空间站可充气展开舱外载荷原理样机结构设计与分析. *载人航天*, 2016, 22: 737–743]
- 13 Dong H P, Wang Y J, An X Y. The conception of reusable space station replenishment (in Chinese). *Astronaut Syst Eng Tech*, 2018, 2: 22–26 [东华鹏, 王亚军, 安雪岩. 可重复使用空间站补给方案设想. *宇航总体技术*, 2018, 2: 22–26]

Key technical characteristics of the Tiangong Space Station

WANG Xiang & WANG Wei

Beijing Spacecraft System Engineering Institute, Beijing 100094, China

The three-step development strategy of the China manned space project culminates in the construction and operation of the space station. The Tiangong space station aims at creating a national space laboratory and platform for international scientific as well as technological cooperation. The station will comprise the Tianhe core module and two experimental modules: Wentian and Mengtian. This study briefly introduces the system scheme of the Tiangong space station and analyzes its technical characteristics with reference to Mir and International Space Station based on system optimization, integration of new and advanced technology, high cost-effectiveness, safety, efficiency of astronauts, and expansion capability are summarized. These parameters reflect the technical achievements and innovation of the Tiangong space station.

space station, manned space project, system scheme, technical characteristics

doi: [10.1360/SST-2021-0304](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0304)