

空间站: 迈向太空的人类探索

景海鹏^{1,2} 辛景民¹ 胡 伟^{1,2} 邓一兵²

摘 要 本文综述了空间站的创始与发展现状,并展望未来的发展前景.首先,介绍空间站的基本概念和重要意义.然后,回顾过去半个多世纪前苏联/俄罗斯和美国间的太空竞争,并阐述了苏联/俄罗斯、美国及多国家各个空间站的发展历史.同时,着重回顾了我国载人飞船和空间站的发展规划和建设历程.最后,展望了空间站未来发展,并提出了我国空间站建设过程中要遵循的特点和思路.

关键词 载人航天, 空间站, 发展历史, 未来发展

引用格式 景海鹏, 辛景民, 胡伟, 邓一兵. 空间站: 迈向太空的人类探索. 自动化学报, 2019, 45(10): 1799–1812

DOI 10.16383/j.aas.c180565

Space Station: Human Exploration in Space

JING Hai-Peng^{1,2} XIN Jing-Min¹ HU Wei^{1,2} DENG Yi-Bing²

Abstract In this paper, the establishment of the space station and its development status are reviewed, and the future development of the space station is considered. Firstly the concept and significance of space station are introduced. Then the space competition between the Soviet Union/Russia and the United States in the past half century is introduced, and the history of the development of various manned space stations built by the Soviet Union/Russia, the United States and many countries is outlined. At the same time, the development planning and construction processes of China's manned spacecraft and space station are focused. Finally, the future development of the space station is considered, and the ideas of developing China's space station are presented.

Key words Manned spacecraft, space station, developing history, future development

Citation Jing Hai-Peng, Xin Jing-Min, Hu Wei, Deng Yi-Bing. Space station: human exploration in space. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(10): 1799–1812

离开地球,翱翔太空,探索宇宙一直是人类的渴望、向往和追求.经过千百年的不懈尝试和努力,伴随着现代科学技术的发展和进步,以智慧和勇于探险的精神,人类终于在 20 世纪实现了飞出地球摇篮的梦想,开启了探索太空的航程.作为承载这个梦想的平台,空间站成为了人类迈向太空的重要基地.

航天之父、现代航天学和火箭理论奠基人之一的前苏联康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基 (Konstantin Tsiolkovsky) 在世界上第一部喷气运动理论著作《利用喷气工具研究宇宙空间》(1903 年),现代火箭和航天先驱之一的德国赫尔曼·奥伯特 (Hermann Oberth) 在航天学经典著作《进入星际空间的火箭》(1923 年) 分别提出了近地轨道站的设想和空

间站方案,并明确提出液体燃料火箭是实现航天的理想工具,系统地奠定了现代航天理论基础^[1–4].现代火箭技术之父美国罗伯特·戈达德 (Robert Goddard) 不仅发明了多级火箭和液体燃料火箭 (1914 年),而且成功发射了世界上第一枚液体燃料火箭 (1926 年),为人类太空探索提供了实用化技术手段.导弹之父、二十世纪著名航天先驱之一的德裔美籍科学家沃纳·冯·布劳恩 (Wernher von Braun) 在《进入空间领域》(1952 年) 中也提出大型轮状空间站设想,为空间站设计提供了思路.

1957 年 10 月前苏联成功发射了世界第一颗人造地球卫星“斯普特尼克 1 号” (Sputnik 1),开启了人类航天时代,迈向太空的探索成为人类发展的必然趋势.在前苏联/俄罗斯、美国、欧盟和中国等许多国家的不懈努力下建设空间站、探索和开发太空已经逐渐成为现实.到目前为止,全世界已经发射了 12 个各种类型的空间实验室/空间站,其中前苏联 8 个、美国 1 个和中国 2 个都已退役,美国、俄罗斯等 16 国共建的 1 个目前在轨运行.

1967 年联合国《关于各国探索和利用包括月

收稿日期 2018-08-24 录用日期 2018-08-30

Manuscript received August 24, 2018; accepted August 30, 2018

本文责任编辑 吕宜生

Recommended by Associate Editor LV Yi-Sheng

1. 西安交通大学人工智能与机器人研究所 西安 710049 2. 中国航天员科研训练中心 北京 100094

1. Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049 2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094

球和其他天体的外层空间活动所应遵守原则的条约》(即《外空条约》)规定,外空探索和利用是全人类共同的事业并应为全人类谋福利。《2016年中国的航天》白皮书明确指出,我国将继续实施载人航天、月球探测等重大工程,深入开展空间科学研究,推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展,到2030年左右我国将跻身世界航天强国行列。中国永久性空间站将于2022年前后建成并投入使用,而且预计2024年后随着“国际空间站”的退役,届时中国空间站将成为在太空运行的唯一空间站^[5]。

1 空间站概述

1.1 空间站

空间站(Space station)(也称为轨道站、轨道空间站)是一种可在绕地球近地轨道上长时间运行、支持人类长期工作和生活的航天器。空间站不具备推进或着陆系统,需要依赖其他航天器完成地面与空间站间的人员和物资运送。与人造卫星、载人飞船、航天飞机等其他太空飞行航天器相比,空间站具有容积大、载人多、寿命长、综合利用程度高等优点,是人类进入太空的重要基地。已退役的空间站包括礼炮(Salyut)系列(含金刚石(Almaz)军用系列)(1971年~1991年)、“空间实验室”(Skylab)(1971年~1979年)、“和平号”(Mir)(1986年~2001年)和我国“天宫一号”(2011年~2016年)、“天宫二号”(2016年~2019年)等空间站或空间实验室,而目前在轨空间站是“国际空间站”(International Space Station, ISS)(1998年至今,有人驻留)。

大型空间站一般包括增压的舱段(如居住舱、实验(工作)舱)、节点舱(如对接舱、连接舱)等重要部分,以及非增压的有效载荷、桁架等连接件、太阳能电池板、散热器、机械臂系统、营救设备等典型部件。同时,为满足航天员在太空工作和生活的多种需要,空间站必须具有许多特殊技术及系统,例如环境控制与生命保障系统(大气环境控制、水处理、固废处理、食物供给等)、通信系统、导航系统、电源系统、热控系统、姿态控制系统、轨道控制系统、推进系统、逃逸救生系统等重要分系统,并涉及轨道选择、飞行模式选择、各分系统初始选择等运行和安全性问题,其中空间站建造和运营的核心关键技术主要包括天地货物补给、空间交会对接、推进剂在轨补加、载人环境控制与生命保障、航天员空间出舱、组合体控制以及在轨维修等。

空间站一般从结构上可分为单模块(或单舱)式空间站、多模块(或多舱)式空间站两种。前

苏联“礼炮1号”至“礼炮7号”、美国“天空实验室”、我国“天宫一号”和“天宫二号”都属于单模块空间站,一般只有1个舱段,可由火箭一次发射入轨,其中“礼炮6号”和“礼炮7号”为第二代实用型空间站,有两个对接口,空间站寿命和航天员驻留时间较长。前苏联/俄罗斯的“和平号”空间站和多国共建的“国际空间站”属于多模块空间站,具有多个舱段,各模块(舱段)由火箭分批送入轨道,然后在太空完成组装,其中“和平号”为第一代多模块空间站(即第三代空间站),由几个舱段直接对接而成,而“国际空间站”为第二代多模块空间站(即第四代空间站),采用桁架挂舱式构型和舱段对接相结合组装而成。这两种永久性空间站具有航天员的生活和工作空间大、灵活性强、运行时间长等优点,但技术复杂,运行费用和风险高。

现在的空间站主要是一个在轨的多用途、人可介入的实验设施,可提供在地球上几乎不存在或难以长期保持同一状态的特殊近地空间环境条件(例如,失重或微重力、真空、空间辐射、极端温度等)以及特殊实验或试验平台,在科学研究、国民经济等方面都有重大价值,对开展生命科学、生物技术、地球勘探、天文观测、物理学、空间工程科学、材料科学等领域的科学研究以及工业和商业应用具有不可替代的重要作用。

空间站不具有返回地面的功能,因此空间站建设离不开火箭和宇宙飞船,其中火箭是唯一能突破第一宇宙速度将宇宙飞船和空间站送入太空的人造航天运载工具,而宇宙飞船是比航天飞机更简单的可往返地面和太空间的载人航天器。此外,航天员必须通过载人飞船或航天飞机与空间站交会对接才能实现进站生活和工作,其中空间交会对接是空间站技术发展的前提和关键。

1.2 国外太空竞争简况

如图1所示,空间站经历了漫长的发展历程,其中前苏联和美国间的相互竞争为人类太空探索做出了巨大贡献^[6]。

20世纪50年代起,前苏联、美国两个超级大国展开了激烈的太空竞赛。1957年10月4日前苏联成功发射了人类第一颗人造地球卫星“斯普特尼克1号”(Sputnik 1)(重约84公斤,直径58厘米,绕地1440圈,1958年1月4日坠毁),从此引发前苏联和美国的激烈太空竞争^[7]。1958年1月31日美国也成功发射了其第一颗人造地球卫星“探索者1号”(Explorer 1)(重约14公斤,直径15厘米,绕地58000圈,1970年3月31日坠毁)^[8],前苏联和美国的太空竞争全面展开。美国于1958年成立国家

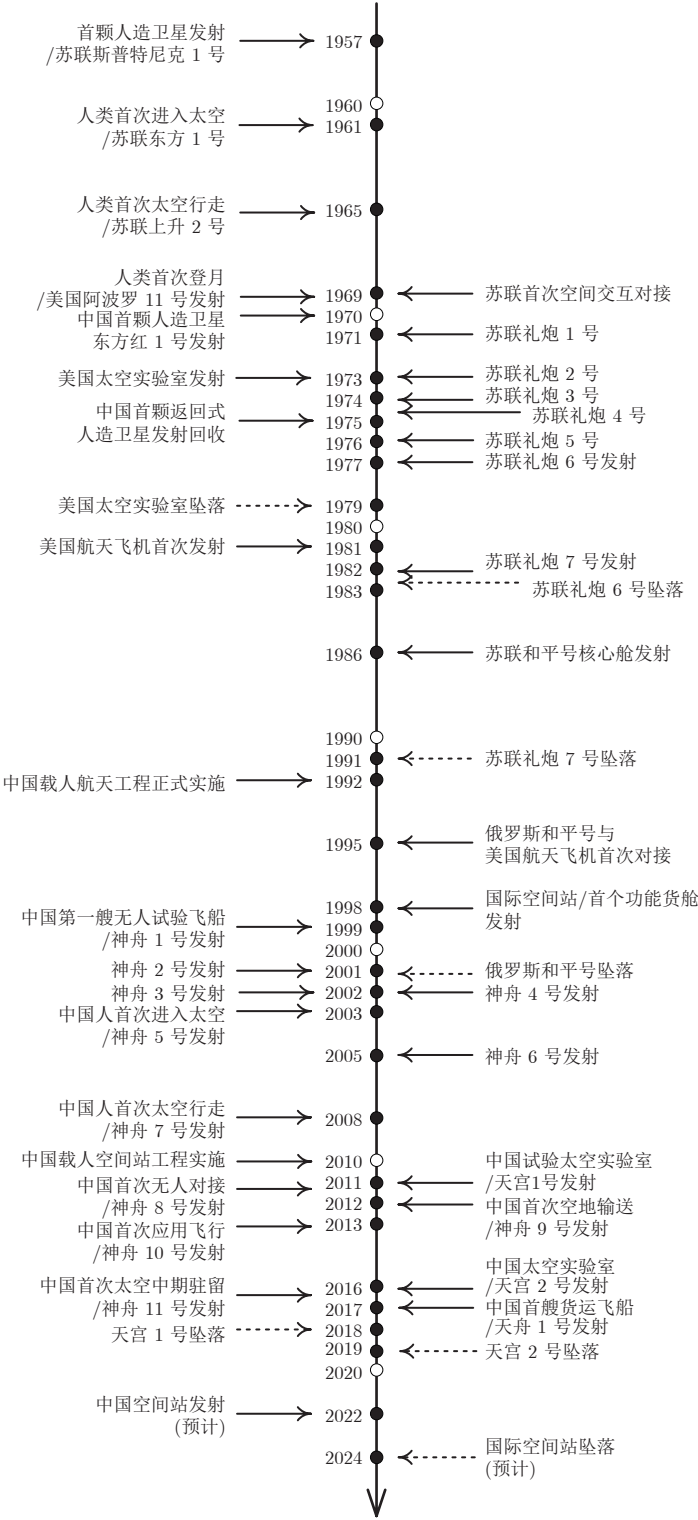


图 1 国内外载人航天发展大事记

Fig. 1 Memorabilia in the development of manned spaceflight in China and other countries

航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 并通过第一个载人航天计划,

而前苏联在掌握弹道导弹技术后也启动了载人航天飞行计划. 1961 年 4 月 12 日前苏联成功发射人类

第一艘双舱型载人飞船“东方1号”(Vostok 1) (在距地约300多公里的轨道上绕地球一周,历时1小时48分钟),实现了人类迈入太空的第一步,尤里·加加林(Yuri Gagarin)成为进入太空第一人,从此前苏联和美国间的太空角逐进入白热化阶段^[9]. 1961年5月5日美国成功发射单舱型飞船“自由7号”(Freedom 7) (亚轨道飞行约15分22秒),艾伦·谢泼德(Alan Shepard)成为第一个进入太空的美国人^[10]. 1965年3月18日前苏联成功发射第二代双舱型载人飞船“上升2号”(Voskhod 2),阿列克谢·列昂诺夫(Alexey Leonov)舱外活动约12分钟,实现了人类首次太空行走^[11]. 1966年3月16日美国“双子座8号”飞船与无人“阿金纳”目标飞行器成功手动操作交会对接,实现了两个航天器之间的首次太空交会对接. 1969年7月16日美国成功发射了三舱型载人飞船“阿波罗11号”(Apollo 11),内尔·阿姆斯特朗(Neil Armstrong)和巴兹·奥尔德林(Buzz Aldrin)成为第一批踏上外星的人类,实现了人类登月的梦想^[12]. 至此苏联、美国间的太空竞赛达到顶峰.

空间站能够保障人类长期在太空生活和工作,在后续激烈的太空竞赛中,前苏联和美国采取不同的技术途径,实施了各具特色的载人航天计划^[13]. 1970年前苏联在成功掌握载人飞船交会对接技术之后,专注于更实用的空间站和载人飞船的研发,并实施了人类第一个空间站计划——“礼炮号计划”^[14]. 在1971年4月19日成功发射了第一个空间站“礼炮1号”之后,前苏联在随后的15年间发射了8个空间站,其中3个军用空间站、5个科研实验空间站,积累了遥遥领先于美国的空间站建设和运行的丰富经验. 尽管美国于1973年5月14日成功发射了第一个“天空实验室”试验性载人空间站,但美国随后选择可重复使用的航天飞机作为太空发展重点^[15]. 1981年4月12日美国第一架航天飞机“哥伦比亚号”首次飞行成功,在太空飞行54小时、环绕地球飞行36周之后安全着陆^[16].

20世纪90年代,随着前苏联解体和国际政治形势变化,美国与俄罗斯两国也开始了太空合作. 1986年2月前苏联发射“和平号”空间站^[17],随后俄罗斯与美国在“和平号”空间站开展了国际合作. 接着,美国与俄罗斯联合其他14个国家于1998年开始共建“国际空间站”,并于2011年完成最后组件安装^[18]. “和平号”空间站、“国际空间站”是人类先后建设的两个永久性大规模空间站. “和平号”空间站已于2001年退役,“国际空间站”预计2024年前后也将退役. 而中国第一个大型模块化永久性空间站将于2022年前后建成并投入使用,届时中国

空间站将成为在太空运行的唯一空间站.

2 国外空间站发展概况

2.1 前苏联及俄罗斯空间站

1) 第一代空间站

礼炮号(Salyut)空间站是前苏联于20世纪70年代至80年代实施的历时最长的一项低轨道载人航天计划. 因当时尚未开展长时间太空停留对人体影响以及可靠生命保障系统等相关研究工作,与美国跨越式发展方式不同,前苏联以循序渐进的技术路线发射了7个礼炮系列空间站,其中“礼炮1号”至“礼炮5号”空间站属于第一代实验性空间站,“礼炮6号”和“礼炮7号”空间站则属于以搭积木方式建设的第二代实用性空间站^[19-31].

“礼炮1号”空间站于1971年4月19日发射,1971年10月11日坠毁,在轨175天,绕地2929圈,飞行距离约1.19亿公里. 如图2所示,它由轨道舱、服务舱和对接舱组成,包括主控制系统、方位与运动控制系统、发动机姿态与机动控制系统、远距离通信系统、电源系统、生命保障系统等,并装有各种试验、照相摄影和科学实验等设备,可居住6名航天员. 在轨期间,“礼炮1号”空间站与“联盟11号”飞船成功对接,3位航天员进入空间站工作和生活24天,完成了植物种植等一系列医学和科学实验. “礼炮1号”空间站标志着载人航天已经从规模较小、飞行时间较短的载人飞船进入规模较大、运行时间较长的空间应用探索试验阶段,也为后续的空间站建设提供了宝贵的经验.

此后至1977年前苏联又相继发射了4个第一代空间站,具体如下:

“礼炮2号”(即第一艘金刚石军用空间站(Almaz military space station)),1973年4月3日发射,1973年5月28日坠毁,在轨54天,绕地866圈,飞行距离约3.5千万公里,无航天员进站.



图2 “礼炮1号”空间站

Fig. 2 “Salute 1” space station

“礼炮 3 号”(即第二艘金刚石军用空间站), 1974 年 6 月 25 日发射, 1975 年 1 月 24 日坠毁, 在轨 213 天, 与“联盟 14 号”载人飞船成功对接 1 次, 1 名航天员进站工作 15 天。

“礼炮 4 号”, 1974 年 12 月 26 日发射, 1977 年 2 月 2 日坠毁, 在轨 770 天, 绕地 12 444 圈, 飞行距离约 3.14 亿公里, 与“联盟 17 号”、“联盟 18 号”载人飞船成功对接 2 次、无人飞船 1 次, 2 批 4 名航天员进站合计工作 92 天。

“礼炮 5 号”(即第三艘金刚石军用空间站), 1976 年 6 月 22 日发射, 1977 年 8 月 28 日坠毁, 在轨 412 天, 绕地 6 666 圈, 飞行距离约 2.7 亿公里, 与“联盟 23 号”、“联盟 24 号”载人飞船成功对接 2 次, 2 批 4 名航天员进站合计工作 67 天。

这些空间站都属于试验性质的第一代空间站, 只配备了一个对接口, 每次只可与一艘“联盟号”系列飞船对接, 仪器设备和主要物品需要发射前装入空间站内。因此这些空间站所携带的有限的氧气、燃料和食品等物资无法得到及时地补充, 不仅制约了航天员空间站驻留时间, 也限制了空间站在轨运行寿命。第一代空间站的在轨时间虽然短暂, 但相比其他航天器有了较大的进步, 而且这些试验性空间站的建造与运行为前苏联建造永久性空间站积累了大量的宝贵经验, 包括催生了空间微重力材料学学科、植物种植实验等。

2) 第二代空间站

以第一代空间站经验为基础, 通过改进系统的自动化程度提高安全性和可靠性以及减轻航天员工作强度, 同时增加飞船对接口以提高空间站在轨运行寿命和扩展应用领域, 前苏联研制了容积更大、结构更复杂的空间站“礼炮 6 号”和“礼炮 7 号”。特别是, 具备 2 个对接口将载人与运货分开, 可与“联盟号”系列载人飞船和“进步号”无人货运飞船同时对接, 提高了燃料、水、食物和其他消耗品等物资的补给能力和实验设备与物品的运输能力, 延长了空间站寿命和航天员在轨时间。同时, 搭载了可确保生活和科研电源供应的三块太阳能电池板、当时先进的多光谱望远镜或 X 射线探测系统, 并增加了医疗设备和锻炼器材。从此前苏联空间站从基本工程研制向实用型转变。

“礼炮 6 号”空间站于 1977 年 9 月 29 日发射, 1982 年 7 月 29 日坠毁, 在轨 1 764 天, 绕地 28 024 圈, 飞行距离约 11 亿公里。“礼炮 6 号”由过渡舱、工作舱和中间室等 3 个密封压力舱以及科学实验仪器舱和两个非密封舱组成, 并具有 2 个对接口、变轨发动机以及太空燃料补给能力等。在轨期间, “礼炮

6 号”先后成功对接 19 艘“联盟号”飞船、4 艘“联盟 T 号”飞船和 12 艘“进步号”货运飞船, 共有前苏联、波兰、东德、古巴等 9 个国家 16 批合计 33 名航天员进站工作 683 天, 出舱活动 3 次, 其中两名航天员列奥尼德·波波夫 (Leonid Popov) 和瓦列里·柳明 (Valery Ryumin) 创造 185 天飞行记录。特别是, “礼炮 6 号”空间站成功对接“宇宙 1267” (Kosmos 1267) 无人空间舱并对接飞行 458 天, 为建设模块式的“和平号”空间站提供了实验依据。航天员们完成了科学观测遥感、植物栽培试验、生物医学实验、空间材料加工等大量任务, 取得了一系列成果, 积累了丰富的载人飞行经验。

“礼炮 7 号”空间站是典型的第二代空间站, 也是前苏联礼炮系列的最后一个空间站, 1982 年 4 月 19 日发射, 1991 年 2 月 7 日坠毁, 在轨 3 216 天, 绕地 51 917 圈, 飞行距离约 21 亿公里。如图 3 所示, “礼炮 7 号”构造和功能与“礼炮 6 号”基本类似, 并配备了专用维修工具。“礼炮 7 号”先后成功对接 9 艘“联盟号 T”飞船、12 艘“进步”号货运飞船和 2 个空间站舱体, 前苏联、法国和印度的 12 批 31 名航天员进入站工作 816 天, 其中三名航天员列昂尼德·基齐姆 (Leonid Kizim)、弗拉基米尔·索洛维约夫 (Vladimir Solovyov) 和奥列格·阿特科夫 (Oleg Atkov) 创造了 237 天飞行记录。在轨期间, 航天员进行了 120 多项实验, 出舱活动 13 次, 对“礼炮 7 号”实施了部件更换和修复工作, 提高了空间站的可靠性, 延长了飞行寿命。前苏联第二名女航天员斯韦特兰娜·萨维茨卡娅 (Svetlana Savitskaya) 两次进入“礼炮 7 号”, 并于 1984 年 7 月成为人类第一个太空行走的女性^[31]。

第二代舱段式实用性空间站外形简单, 不需复杂的在轨对接组合或装配等过程, 每个舱段都带有



图 3 “礼炮 7 号”空间站

Fig. 3 “Saluto 7” space station

独立的发动机和发电系统,具有风险和难度较小,安全性较高等特点.但空间站规模小,各种载荷安装十分紧凑,不仅限制了有效载荷规模,也增加了故障修理的难度.另外,不同舱段太阳能电池的相互遮挡也十分严重.第二代空间站为后续的“和平号”和“国际空间站”积累了建设经验,而且“联盟号”载人飞船和“进步号”无人货运飞船也为后续的空间站大量的人员和物资往返运输提供保障.

3) 第三代空间站

在“礼炮”系列第一代、第二代空间站成功经验的基础上,前苏联建造了首个第三代长久性模块化的“和平号”空间站,标志着前苏联空间站的新阶段,其目的就是在太空中提供一个大型且可居住的科学实验室^[32].1986年2月20日空间站核心舱发射,1996年4月完成所有组件安装,2001年3月23日坠毁,在轨5510天,有人驻留4592天,绕地86331圈,前苏联解体后归俄罗斯所有.

如图4所示,“和平号”空间站采用组合式积木结构,其核心舱是一个基于第二代空间站设计的舱段结构,由增压工作舱、球形增压转移舱(有径向1个、侧部对称4个等5个对接口)、不增压服务动力舱和增压转移对接器(有1个对接口)等4个基本功能部分和6个对接口组成.在核心舱发射后的10余年间,前苏联为核心舱增加了量子1号(Kvant-1)天体物理实验舱(1987年4月)、量子2号增强服务舱(1989年11月)和晶体号(Kristall)实验扩展舱(可对接美国航天飞机)(1990年5月)等3个舱段,俄罗斯为核心舱增加了光谱号(Spektr)电源舱(1995年5月)、航天飞机对接舱(1995年11月)、自然号(Priroda)地球遥感舱(1996年4月)等3个舱段,“和平号”空间站的功能舱不断增加、规模逐步扩大.1996年4月整个“和平号”空间站全部组装完成,可与“联盟号”载人飞船、“进步号”货运

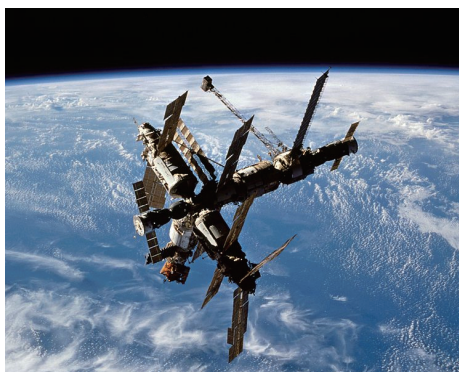


图4 “和平号”空间站
Fig. 4 “Mir” space station

飞船组成一个轨道联合体,成为当时最庞大的太空设施,全长约87米,总重约130吨(与航天飞机对接时则重200多吨),有效容积约470立方米.

随着苏联的解体和太空竞赛的结束,拥有丰富载人航天和空间站建设及运行经验的俄罗斯和拥有强大经济与科技实力的美国于1993年推出了“和平号航天飞机”计划(Shuttle-Mir Program),“和平号”也成为两国第一次大规模太空技术合作交流的舞台^[33].在轨15余年间,先后与1艘“联盟T”载人飞船、29艘“联盟TM”载人飞船,64艘“进步号”货运飞船对接,9次与美国航天飞机对接并联合飞行.除3次短期无人驻留外,前苏联/俄罗斯、美国、英国、法国、德国、日本等12个国家、104名航天员(其中11人女性,1名日本太空记者)、137人次进站,实施了80次太空行走,完成了24个国际性科研计划和约22000次科学实验^[34-37].俄罗斯航天员瓦列里·波利雅科夫(Valeri Polyakov)创造了太空连续驻留438天的世界纪录,谢尔盖·阿夫杰耶夫(Sergei Avdeyev)先后3次进入“和平号”累计驻留748天,美国女航天员香农·露西德(Shannon Lucid)创造女性太空飞行188天的最高记录.

“和平号”诞生于激烈的太空竞争时期,研制上阵仓促,在设计和技术上存在着不同程度的问题(例如供电严重不足、天地往返输送能力不足、姿控系统不良、振源多振动大、天地联系不顺畅等),而且后期因超设计寿命飞行,部件老化严重,运行和维修耗资巨大,运行效率较低,故障频繁.另一方面,“和平号”的多模块组合方式提高了空间站建设的操作灵活性,减少了对单个非常强大运载火箭的依赖.20世纪90年代俄罗斯和美国间的太空合作,也为后期“国际空间站”建设积累了丰富经验.“和平号”作为当时体积最大、应用技术最先进、设施最完善、在轨时间最长的空间站,在生物学、人类生物学、物理学、天文学、气象学和航天器系统等方面中进行了大量科学实验和许多有益探索,取得了大量数据和具有重大实用价值的成果,为太空探索积累了丰富的经验.

2.2 美国天空实验室

“天空实验室”是美国第一个试验性空间站,属于第一代非永久试验性空间站(仅有一个对接口,无法进行货运补给,无在轨推进系统).1973年5月14日核心部件发射,1979年7月11日坠毁,在轨2249天,绕地34981圈,飞行距离约14亿公里^[38].

如图5所示,“天空实验室”全长36米,直径



图 5 “天空实验室”空间站
Fig. 5 “Skylab” space station

6.7 米, 重约 80 吨, 由轨道工作舱、过渡舱 (气闸舱)、多用途对接舱、太阳望远镜和“阿波罗”飞船 5 部分组成。其中, 工作舱是航天员主要工作和生活舱室, 太阳望远镜是天空实验室上的一个天文台, 可拍摄太阳的紫外光线和 X 射线等。“天空实验室”是通过两次发射的核心部件与飞船在轨对接构成的完整空间站, 其中核心部件 (包括工作舱、过渡舱、对接舱、太阳望远镜) 于 1973 年 5 月发射, “阿波罗”飞船分别于 1973 年 5 月、7 月和 11 月发射 (称为天空实验室—2、3、4)。在轨运行期间, 3 批 9 名航天员进站分别工作 28 天、59 天和 84 天 (合计 171 天), 共进行约 300 项有关生命科学、天文观测、材料科学、资源勘探等实验, 取得了丰富的科研成果, 并进行了与军事相关任务。

2.3 国际空间站

20 世纪 90 年代随着太空竞赛的结束, 1998 年美国国家航空航天局 (NASA)、俄罗斯联邦航天局 (Roscosmos)、日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA)、加拿大国家航天局 (CSA)、欧洲航天局 (ESA) 和巴西航天局 (AEB) 等 6 家空间机构启动“国际空间站”合作, 美国、俄罗斯联合欧洲航天局 11 个国家 (德国、法国、意大利、西班牙、荷兰、比利时、丹麦、挪威、瑞典、瑞士和英国) 以及日本、加拿大和巴西等 16 个国家联合分工建设“国际空间站” (因美国反对, 中国被排除在外)。“国际空间站”是历史上最大的国际科技合作项目和最雄心勃勃的太空探索项目, 其主要目的就是建设一个低地球轨道的实验室、观测台和工厂, 并为未来可能的月球、火星和小行星探索任务提供运输、维护以及中转基地。“国际空间站”设计寿命为 10 至 15 年, 指挥和控制由美国和俄罗斯双方分担, 1998 年 11 月 20 日主体核心舱发射, 2011 年 12 月完成所有组件安装, 截至 2018 年 8 月 4 日已在轨 19 年 8 月 15 天、有人驻留

17 年 2 月 9 天、绕地 86 331 圈^[39-40]。

如图 6 所示, 作为第四代和长期载人空间站, “国际空间站”采用桁架挂舱式构型, 拥有几十个舱段和大型构件, 主要包括航天员居住舱、实验舱、服务舱、对接过渡舱、桁架、太阳能电池等部分, 其中以组装式桁架为基础结构, 各种增压舱和服务设施挂在桁架上。这种结构既可保证空间站刚度, 又不影响各子系统、实验设备等的工作性能, 也便于设备装配和维修。“国际空间站”被分为俄罗斯轨道段 (ROS) 和美国轨道段 (USOS) 两个主要部分, USOS (包含欧洲和日本的舱段) 中各个舱段统一使用桁架上的太阳能电池和散热器, 基本不包含动力系统, 而 ROS (即最早建成的部分) 中每个舱段拥有独立的发动机和太阳能电池。

“国际空间站”第一个组件“曙光号”功能舱 (Zarya) 由俄罗斯于 1998 年 11 月 20 日发射, 利用航天飞机和无人货运飞船先后将太空舱、太阳能电池板、支持设备等各种模块和补给品等运送到空间站, 再通过航天员太空活动和操纵机械臂进行组装, “国际空间站”于 2011 年 12 月完成最后 1 个组件的安装。建成后的国际空间站结构复杂, 规模庞大, 其中包括俄罗斯“科学号” (Nauka) (待发射)、美国“命运号” (Destiny) (兼国际空间站的指挥和控制中心)、欧洲航天局“哥伦布” (Columbus)、日本“希望号” (Kibo) 等 4 个实验舱; “团结号” (Unity)、 “和谐号” (Harmony)、 “宁静号” (Tranquility) 等 3 个连接舱; 美国部分“寻求号” (Quest), 俄罗斯部分“码头号” (Pirs)、 “研究号” (Poisk) 等 3 个气闸舱; 加拿大 2 号 (Canadarm 2)、加拿大灵巧号 (Dextre)、日本希望号实验舱机械臂 (JEM RMS)、欧洲航天局机械臂 (ERA) (待发射)、德国 Rokviss (待发射) 等机械臂; “星辰号”服务舱 (Zvezda) (俄罗斯建造的核心舱, 由过渡舱、生活舱和工作舱等 3 个密封舱和 1 个非密封舱组成, 有 4 个对接口, 可对接载人飞船或货运飞船)、“曙光号”功能舱 (俄罗斯

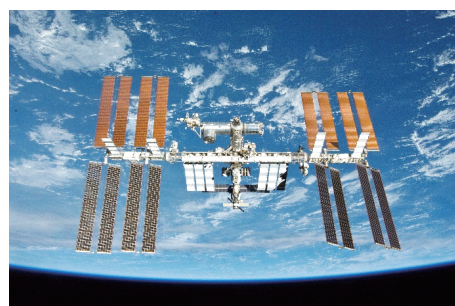


图 6 “国际空间站”
Fig. 6 “International Space Station”

建造的基本舱,可连接空间站的各实验室和航天员的生活舱)以及对接舱、“莱昂纳多号”储物舱(Leonardo)、希望号后勤储物舱、黎明号中转舱(Rassvet)、穹顶舱(Cupola)以及阿尔法磁谱仪(AMS),多个大型桁架、外部储物平台、散热器、太阳能电池板等各国研制的众多组件.建成后国际空间站宽108.5米,长88米,高44米,重约400吨,轨道周期为91分钟.

截至2018年8月4日,美国“发现号”、“奋进号”、“亚特兰蒂斯号”等航天飞机(2011年7月以前)、俄罗斯“进步M号”、欧洲航天局自动转移飞行器(ATV)、日本HTV“白鹤号”以及美国“猎户座”、“龙”(Dragon)等货运无人飞船等共110次飞行完成大量设备等物资的天地运送,通过36次美国航天飞机(2011年7月以前)和56次俄罗斯“联盟TM号”、“联盟TMA号”载人飞船共92次太空飞行,美国、俄罗斯、日本、加拿大、意大利、法国、德国、英国等18个国家、235名航天员(其中34名女性,7名游客)、405人次进入空间站,实施了出舱活动211次安装和维修设备以及科研实验^[41~46].在近20年间,“国际空间站”作为一个微重力和空间环境研究实验室和开发太空资源的国际合作平台,航天员在生物学、人类生物学、物理学、天文学、气象学和其他领域进行各种各样的实验.俄罗斯航天员根纳季·帕达尔卡(Gennady Padalka)先后5次进入“国际空间站”,创造879天的世界太空记录.“国际空间站”已成为太空开发国际合作的标志.

3 中国载人飞船与空间站的建设

3.1 发展规划

如前所述,一般载人航天分2种途径:以载人飞船为载人飞行器(前苏联为代表)或以航天飞机为载人飞行器(美国为代表).我国也选择以载人飞船来发展载人航天.我国航天事业始于1956年,1970年4月成功发射“东方红一号”人造卫星,1975年11月成功发射并回收了第一颗返回式卫星.随后,各种类型的卫星相继研制和发射成功,以及长征二号等捆绑式大推力运载火箭及发动机高空点火控制技术相继取得巨大进展,为我国载人航天打下了坚实的技术研究基础,积累了丰富的工程经验并提供了强有力的保障.

1992年9月我国载人航天工程(代号“921工程”)正式实施,并确定“三步走”发展战略: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,突破载人飞船和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,解决有较大规模的、长期有人照料的空间应用问题.2005年2月,中央批准实施载人航天工程第二步第一阶段任务,其主要任务目标为:1)实施航天员出舱活动,突破航天员出舱活动技术;2)实施航天器交会对接任务,突破和掌握航天器交会对接技术;3)开展有效的空间应用、空间科学与技术实验;4)为工程进一步的发展创造基本条件.

2010年9月我国空间发展计划——《载人空间站工程实施方案》正式获批,中国空间站计划(China Space Station Plan)正式启动实施,其中明确我国空间站工程的战略目标是:在2020年前后,建成和运营近地空间站,使我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验和综合开发利用太空资源能力的国家.我国载人空间站(简称中国空间站)是一个在轨组装而成的具有中国特色的空间站系统,预计于2022年左右建成,计划在轨运营10年以上,将成为中国空间科学和新技术研究实验的重要基地,开展科学研究和太空实验,促进中国空间科学研究进入世界先进行列,为人类文明发展进步做出贡献.

如图1所示,从1999年起我国载人航天工程通过发射11艘神舟系列无人和载人飞船、1艘天舟系列货运飞船以及2个天宫系列空间实验室,先后实现了从无人飞行到载人飞行,从一人一天到多人多天,从舱内实验到出舱活动,从单个飞行器飞行到两个航天器交会对接等一系列重大突破,分别完成了我国载人航天工程的第一步“突破和掌握载人的天地往返技术”(1999年~2005年,即“神舟一号”~“神舟六号”)、第二步“掌握空间交会对接技术及建立空间实验室”(2008年~2017年,即“神舟七号”~“天舟一号”).其中,第二步中的空间实验室任务阶段主要由“天宫二号”、“神舟十一号”载人飞船和“天舟一号”货运飞船等飞行任务组成.

3.2 载人飞船建设历程

与前苏联的“东方号”、“上升号”,美国的“水星号”、“双子座”号所采用的两舱设计相比,我国的神舟系列飞船一般采用三舱一段,即由轨道舱、返回舱、推进舱和附加段组成.其中轨道舱是一个圆柱体,长约2.8米,最大直径约2.3米,一端与返回舱相通,另一端可连接空间对接机构,飞船入轨后作为航天员生活和工作的空间,返回舱返回后

可继续留轨利用,这也是我国飞船的特色;返回舱(即座舱)呈钟形密闭结构,长约2米,直径约2.4米,前端有舱门,也是飞船的指挥控制中心;推进舱(即仪器舱或设备舱)呈圆柱形,长约3米,直径约2.5米,底部直径约2.8米,安装推进系统、电源、轨道制动,并为航天员提供氧气和水;附加段(即过渡段)主要用于与其他飞船或空间站交会^[47].

1) “神舟一号”: 实现天地往返重大突破

1999年11月20日我国第一艘无人试验飞船“神舟一号”发射,飞行约21小时11分,绕地14圈,11月21日返回.飞船由轨道舱、返回舱和推进舱组成.作为我国载人航天工程的首次飞行,此次飞行不仅验证了飞船关键技术和系统设计以及包括发射、测控通信、着陆回收等在内的整个工程大系统工作协调性,而且标志着我国在载人航天飞行技术上有了重大突破,成为中国航天史上的重要里程碑.

2) “神舟二号”: 第一艘正样无人飞船

2001年1月10日“神舟二号”飞船发射,飞行约162小时22分,绕地108圈,1月16日返回.飞船由轨道舱、返回舱和推进舱组成,是我国第一艘正样无人飞船,其技术状态与载人飞船基本一致,完全按照载人飞船的环境和条件进行发射.在轨期间,首次进行了微重力环境下的生命科学、材料、天文和物理等实验.“神舟二号”标志着我国向实现载人航天飞行迈出了重要一步.

3) “神舟三号”: 搭载模拟人

2002年3月25日“神舟三号”飞船发射,飞行约162小时39分,绕地108圈,4月1日返回.“神舟三号”是一艘飞船技术状态与载人状态完全一致的正样无人飞船,由轨道舱、返回舱、推进舱和附加段组成,搭载了人体代谢模拟装置、拟人生理信号设备以及模拟人,具备了航天员逃逸和应急救援功能.飞行期间,完成了空间生命、空间材料科学等实验和探测任务.“神舟三号”标志着我国载人航天工程取得重要进展,为载人太空飞行打下了坚实的基础.

4) “神舟四号”: 创低温发射记录

2002年12月30日“神舟四号”发射,飞行约162小时36分,绕地108圈,2003年1月5日返回.该飞船是第一艘可载人的处于无人状态的飞船,由推进舱、返回舱、轨道舱和附加段组成,并搭载模拟人.此次飞行完成了对地观测、材料科学、生命科学实验和空间天文和空间环境探测等任务,也是在无人状态下最全面的一次飞行试验,标志着中国向实现载人飞行又迈出了重要一步,为最终实现载人飞行奠定了坚实基础.

5) “神舟五号”: 我国首位航天员进太空

2003年10月15日我国第一艘载人飞船“神舟五号”发射,飞行约21小时28分,绕地14圈,10月16日返回,航天员杨利伟成为第一位进入太空的中国人.飞船由轨道舱、返回舱、推进舱和附加段组成,主要考察航天员在太空环境中的适应性.此次飞行实现了我国首次载人航天飞行,标志着我国成为继苏/俄、美之后世界上第三个能够独立开展载人航天活动的国家,标志着我国载人航天事业迈出了关键的一步,是我国航天发展史上的一座重要的里程碑.

6) “神舟六号”: 实现“二人多天”飞行任务

2005年10月12日我国第二艘载人飞船“神舟六号”发射,飞行约115小时33分,绕地77圈,10月17日返回舱返回,航天员费俊龙、聂海胜进入太空.飞船是我国第一艘执行“多人多天”任务的载人飞船,由轨道舱、返回舱和推进舱组成,取消了附加段.较以前飞船相比,增加了食物、水等生活物资量,提高了返回舱的环境控制能力和安全性,改进完善了轨道舱的生活功能.航天员进入轨道舱进行空间科学和技术实验的操作,完成了我国首次真正意义上有人参与的空间科学实验.此外,航天员返回后轨道舱留轨运行了707天,继续开展了大量的科学实验,为长寿命空间飞行器的研制积累了经验.此次飞行标志着我国多项载人航天技术达到世界领先水平 and 我国载人航天工程“三步走”发展战略第一步的顺利完成.

7) “神舟七号”: 首次出舱太空行走

2008年9月25日我国第三艘载人飞船“神舟七号”发射,飞行约68小时30分钟,绕地45圈,9月28日返回,航天员翟志刚、刘伯明和景海鹏进入太空.飞船由轨道舱、返回舱和推进舱构成,攻克了气闸舱和舱外航天服等核心技术难关.此次飞行实现了中国航天员首次空间出舱活动(2008年9月25日),翟志刚成为第一位出舱太空行走的中国人.飞行期间开展卫星伴飞、卫星数据中继等空间科学和技术试验.此次飞行标志我国已成为世界上第三个掌握空间出舱活动技术的国家,也是我国航天事业继“东方红一号”、“载人首次飞行”、“嫦娥一号”之后的第四个里程碑,开启了我国载人航天工程“三步走”发展战略第二步.

8) “神舟八号”: 首次无人空间对接

2011年11月1日“神舟八号”无人飞船发射,飞行约397小时13分,11月17日返回.飞船为改进型飞船,由轨道舱、返回舱、推进舱组成,轨道舱前端安装自动式对接机构,具备自动和手动交会对接与分离功能.此次飞行完成了2次“神舟八号”

与“天宫一号”间的空间自动交会对接试验,组成一座小型简易空间实验室(即短期无人照料的空间站),并开展了空间科学实验.因此,此次飞行标志着我国已成功突破和掌握空间交会对接和组合体运行等一系列关键技术,实现了空间技术重大跨越,为后续空间站建造、管理和运营积累经验,也是我国载人航天发展史上的又一个重要里程碑.

9) “神舟九号”:首次载人交会

2012年6月16日“神舟九号”飞船发射,飞行约327小时23分,6月29日返回,航天员景海鹏、刘旺和刘洋进入太空,其中刘洋成为第一位进入太空的中国女性.飞船由推进舱、返回舱、轨道舱和附加段组成,轨道舱增加了前舱门.此次飞行实施了飞船与“天宫一号”空间实验室的首次载人(前向)自动空间交会对接(6月18日)和首次航天员手动控制交会对接(6月24日),并第一次实现了地天间人员和物资的往返运输与补给,而且航天员在“天宫一号”内完成了实验操作.此次飞行标志着我国成为世界上第三个完整掌握空间交会对接技术的国家,并具备了以不同对接方式向在轨航天器进行人员输送和物资补给的能力,为今后的载人航天的发展、空间站的建设奠定了良好的基础.

10) “神舟十号”:首次应用性飞行

2013年6月11日“神舟十号”飞船发射,飞行15天,其中12天与“天宫一号”空间实验室组成组合体飞行,2013年6月26日返回,航天员聂海胜、张晓光和王亚平进入太空.飞船由推进舱、返回舱、轨道舱和附加段组成,轨道舱增加了前舱门.此次飞行是第三次交会对接飞行和载人天地往返运输系统的首次应用性飞行,实施了飞船与“天宫一号”载人自动交会对接(6月13日)、手动控制交会对接(6月23日)和首次航天器绕飞交会(6月25日)等试验.航天员在“天宫一号”内开展了航天器技术、航天医学和太空授课活动公益项目等多项在轨实验/试验活动.此次飞行任务标志着神舟飞船由研制飞行试验型过渡到实用型的飞跃、“天宫一号”作为交会对接目标飞行器向空间多用途载人航天试验平台的转变,为后续空间站工程建设积累经验,标志着我国载人航天工程“三步走”发展战略第二步任务第一阶段完成.

11) “神舟十一号”:首次太空中期驻留

2016年10月17日“神舟十一号”载人飞船发射,飞行33天,11月18日返回,航天员景海鹏和陈冬进入太空.飞船为三舱结构,由轨道舱、返回舱和推进舱组成,其前端安装自动式对接机构,长9米,最大直径2.8米,起飞质量8吨.在轨期间,飞

船与“天宫二号”空间实验室自动交会对接并形成组合体(10月19日),开展了地球观测和空间地球系统科学、农作物培育、空间应用新技术、空间技术和航天医学等领域的试验,并实施了人类史上首次太空脑机交互实验.航天员驻留“天宫二号”空间实验室30天,创造了中国航天员太空驻留新纪录.此次飞行是我国飞得更高、实验更多、持续时间最长(总飞行时间33天)的一次载人飞行任务,是我国载人航天工程“三步走”发展战略从第二步到第三步的一个过渡,为中国建造永久载人空间站做准备.

12) “天舟一号”:首艘货运飞船

2017年4月20日“天舟一号”货运飞船发射,在轨飞行约154天22小时,9月22日再入大气层烧毁.如图7所示,“天舟一号”是由货物舱和推进舱组成的两舱构型全密封货运飞船,全长约10.6米,最大直径3.35米,物资运输能力约6.5吨,推进剂补加能力约2吨,具备独立飞行3个月的能力,货物运载量是俄罗斯“进步号M”无人货运飞船的2.6倍,在功能、性能上都处于国际先进水平.飞船与在轨运行的“天宫二号”空间实验室进行3次自主快速交会对接试验、3次推进剂在轨补加试验、绕飞试验、在轨释放立方星“丝路一号”科学试验卫星,并开展空间应用及技术试验,验证了空间站货物补给、推进剂在轨补加、自主快速交会对接等一系列重要关键技术,为中国空间站研制建设和运营管理积累了重要经验.

此次飞行标志着我国已成为世界上第三个独立掌握推进剂在轨补加技术的国家,填补了我国空间货物运输系统空白,为我国空间站组装建造和在轨长期载人飞行奠定重要技术基础.至此,我国载人航天工程第二步已胜利完成,也正式宣告我国航天迈进空间站时代.

3.3 空间实验室

1) “天宫一号”:首个试验空间实验室

2011年9月29日我国第一个目标飞行器“天宫一号”发射,飞行2376天,有人驻留20天,2018年4月2日坠毁.“天宫一号”是我国首个简易空间实验室,只有1个交会对接口,属于第一代空间站.如图8所示,“天宫一号”由实验舱和资源舱构成,全长10.4米,最大直径3.35米,重约8.5吨.实验舱由密封舱和装有对地遥感设备的非密封后锥段组成,其中密封舱是飞行器的控制舱,也是航天员的工作舱和生活舱,实验舱前端装有可与载人飞船交会对接的装置.资源舱为非密封舱,主要为轨道机动提供动力、燃料和电能等,舱外装有一对太阳能电池翼及



图7 “天舟一号”货运飞船示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the “Tianzhou-1” cargo vehicle



图8 “天宫一号”空间实验室示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the “Tiangong-1” space laboratory

中继卫星天线,其尾部装有2台490 N 轨控发动机.

如前所述,在轨期间,“天宫一号”先后和1艘无人飞船(2011年11月1日“神舟八号”)、2艘载人飞船(2012年6月18日“神舟九号”、2013年6月13日“神舟十号”)完成了4次自动和2次航天员手控交会对接,2批6名航天员进入“天宫一号”,航天员短期在轨驻留,并开展了对地遥感应用、空间物理与环境探测和空间材料等实验,获取了大量有价值的信息数据和十分丰硕的应用成果.作为我国首个试验空间实验室,“天宫一号”完成了航天器组合体控制与管理、航天员在轨驻留保障、航天员在轨维修操作等一系列技术试验验证,为我国载人空间站研制建设和运营管理积累了十分宝贵的经验.

“天宫一号”主要用于试验未来空间站建设所需的交会和对接关键技术.“天宫一号”的发射是我国载人空间站的起点,标志着中国已经拥有建立初步空间站(即短期无人照料空间站)的能力,同时也标志着我国已迈入载人航天工程“三步走”发展战略的第二步.

2) “天宫二号”:真正的空间实验室

2016年9月15日“天宫二号”发射进入太空,飞行1 037天,2019年7月19日以受控方式离轨.“天宫二号”属于第一代空间站.“天宫二号”在外

形、结构、尺寸、质量上与“天宫一号”基本一致,由实验舱和资源舱组成,只有1个交会对接口,但采用模块化舱内设备设计,增加推进剂补加系统,配备在轨维修技术验证和机械臂维修操作验证系统.

在轨期间,“天宫二号”于2016年10月19日与“神舟十一号”载人飞船自动交会对接形成组合体(如图9所示),航天员景海鹏和陈冬进入空间实验室完成30天的中期在轨驻留任务,并进行了较大规模的地球观测、航天医学、空间应用新技术、植物培育、释放伴飞小卫星、首次太空脑机交互等实验或试验.如图10所示,“天宫二号”于2017年与“天舟一号”无人货运飞船先后完成了3次自主快速交会对接试验(4月22日、6月19日、9月12日)、3次推进剂在轨补加试验(4月27日、6月15日、9月16日)、绕飞试验(6月19日)、在轨释放立方星(8月1日)等实验或试验.

作为我国第一个真正意义上的可开展各类空间科学实验和空间应用试验的空间实验室,“天宫二号”是一个长期在轨自动运行、短期载人的航天器,并搭载了14项应用载荷以及一些航天医学实验设备,在数量上和安装复杂程度上都创造了我国历次载人航天器任务之最,也是“飞得更高、实验更多、时间更长”的飞行器.“天宫二号”完成了航天员中期驻留,考核和验证了面向长期飞行的乘员生活、健康和工作保障等相关技术、推进剂在轨补加技术等,为未来空间站建成并运行奠定了重要基础.因此,“天宫二号”是中国空间站建设的最后一次全面技术验证,标志着我国全面进入空间实验室任务实施阶段.

3.4 未来中国空间站

空间站建设是我国载人航天工程三步走战略的第三步.如图11所示,中国载人空间站(名称“天宫”,代号“TG”)是一个在轨组装成的具有中国特色的空间实验室系统,初期的空间站将建造三个舱段,采用对称T形构型,包括一个核心舱和两个实验舱,核心舱居中,实验舱I和实验舱II分别连接于两侧,每个规模20多吨.核心舱设有多个交会对接口,其中前端两个对接口主要接纳载人飞船(名称“神舟”)停靠往返运送人员,而后端的后向对接口主要用于货运飞船(名称“天舟”)停靠完成物资补给和废弃物下行.同时,空间站上设气闸舱用于航天员出舱,并配置机械臂用于辅助对接、补给、出舱和科学实验.空间站轨道高度为400至450公里,设计寿命为10年,总重量可达90吨.长期驻留3人,乘组轮换时最多可达6人.空间站运营期间,最多的时候,将可对接1艘货运飞船、2艘载人飞



图9 “天宫二号”空间实验室与“神舟十一号”载人飞船交会对接模拟图

Fig. 9 Schematic diagram of the rendezvous and docking between the “Tiangong-2” space laboratory and the “Shenzhou-11” manned spaceship



图10 “天舟一号”无人货运飞船与“天宫二号”空间实验室交会对接示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the rendezvous and docking between the “Tianzhou-1” unmanned cargo vehicle and the “Tiangong-2” space laboratory



图11 中国空间站示意图

Fig. 11 Schematic diagram of China's space station

船, 这些飞船又可与核心舱组合成多种形态的空间组合体, 在核心舱统一调度下协同工作, 完成空间站承担的各项任务^[48].

在运营阶段, 将可以根据科学研究的需要增加新的舱段, 扩展规模和应用能力. 中国空间站初期的5个模块具体如下.

1) 核心舱

全长约 18.1 米, 最大直径约 4.2 米, 发射质量

20 至 22 吨. 核心舱模块分为节点舱、生活控制舱和资源舱, 核心舱有 5 个对接口, 可以对接 1 艘货运飞船、2 艘载人飞船和 2 个实验舱, 另有一个供航天员出舱活动的出舱口. 主要任务包括为航天员提供居住环境, 支持航天员的长期在轨驻留, 支持飞船和扩展模块对接停靠并开展少量的空间应用实验, 是空间站的管理和控制中心.

2) 实验舱 I、实验舱 II

全长均约 14.4 米, 最大直径均约 4.2 米, 发射质量均约 20 至 22 吨. 实验舱 II 以应用实验任务为主, 实验舱 I 兼有组合体控制任务、应用实验任务二个功能. 实验舱 I、II 先后发射, 具备独立飞行功能, 与核心舱对接后形成组合体, 可开展长期在轨驻留的空间应用和新技术试验, 并对核心舱平台功能予以备份和增强.

3) 货运飞船 (名称“天舟”, 代号“TZ”)

货运飞船采用模块化设计, 具有全密封货舱、半密封/半开放货舱、全开放货舱三种构型, 可以把不同的载荷包括小型舱段运输上去, 由航天员和机械臂将其装配到空间站上, 最大直径约 3.35 米, 发射质量不大于 13 吨. “天舟”是唯一拥有大载荷的运输能力又能进行太空补加的货运飞船, 载重量在 6 吨左右, 与欧洲 ATV 系列货运飞船和日本 HTV 系列货运飞船的载重量基本相当, 远远大于前苏联“联盟号”飞船载重量 (仅 300 公斤左右) 及其改装型“进步号”货运飞船载 (约 2.5 吨).

作为空间站的地面后勤保障系统, 货运飞船的作用是为未来空间站补给燃料、食物等物品, 提供能源动力及后勤保障. 货运飞船主要任务: 1) 补给空间站的推进剂消耗, 空气泄漏, 运送空间站维修和更换设备, 延长空间站的在轨飞行寿命; 2) 运送航天员工作和生活用品, 保障空间站航天员在轨中长期驻留和工作; 3) 运送空间科学实验设备和用品, 支持和保障空间站具备开展较大规模空间科学实验与应用的条件.

4) 未来舱段

中国空间站具备扩展能力. 在运营阶段, 将可以根据科学研究的需要增加新的舱段, 扩展规模和应用能力.

4 思考与展望

我国在载人空间站建设方面起步较晚, 空间站的研究和建设遵循规模适度原则, 有利于控制工程的成本, 重点突出载人航天的特色, 突出发挥人在太空中的作用, 以“由小舱到大舱, 由单舱到三舱”为技术路线, 稳步前进并已经取得了辉煌的成就.

尽管在通信、网络、数据管理和应用等方面,我国空间站研发采用了不少较国外空间站更为先进的技术,突破了推进剂补加、物化式再生生命保障、电源和空间机械臂等关键技术,为给航天员的生活、工作、实验提供很好的条件,保证满足空间科学研究的需要。但我国空间站建设仍面临许多控制技术、能源技术、再生技术等方面的挑战,例如:

1) 大推力运载火箭是发展航天技术的基础,我国空间站建设迫切需要研制大推力运载火箭为人员和物资输送提供有力保障。

2) 需要建立物质闭合度更高的再生式生命保障系统,提高固废和水的循环利用率,实现部分食物的自给自足,为长期太空驻留、载人深空探测以及未来地外星球基地开发等生命保障提供新途径。

3) 需要采用新的电推进技术作为空间站轨道维持的动力装置,降低空间站运行期间的推进剂补给需求。

4) 需要大力发展基于混合增强智能的生命保障技术,提高空间站生命保障系统智能化和自动化水平,从而提高空间站运行和航天员工作的效率。

我国空间站、载人登月及其前沿科学探索、太空技术研究、太空资源的开发和利用以及太空技术合作、国际交流与合作势必将创造可观的经济社会效益,进一步促进和带动我国经济发展,并给人民群众的生活带来巨大的变化,也将造福人类。

“地球是人类的摇篮,但人类不可能永远被束缚在摇篮里”。可以预见,我国空间站和载人航天必将为深空探测以及把人类的活动疆域从近地空间拓展到整个太阳系范围做出重要的贡献。

附录

图 2 引自 <http://www.todayshistory.org/19-april-1971-2/10892/>

图 3 引自 <http://www.spacefacts.de/english/salyut.htm>

图 4 引自 <https://en.wikipedia.org/wiki/Mir>

图 5 引自 https://www.nasa.gov/mission_pages/skylab

图 6 引自 <https://www.nasa.gov>

图 7 引自 <http://www.cast.cn>

图 8 引自 <http://www.cmse.gov.cn>

图 9 引自 <http://www.cmse.gov.cn>

图 10 引自 <http://www.cmse.gov.cn>

图 11 引自 <http://www.cmse.gov.cn>

References

- 1 Ernst Messerschmid, Reinhold Bertrand. *Space Station Systems and Utilization (Chinese Version, Translated by Zhou Jianping)*. Beijing: China Aerospace

Publishing House. 2013.

(厄恩斯特·梅瑟施米德, 莱茵霍尔德·伯特兰著, 周建平等译. 空间站系统和应用, 北京: 中国宇航出版社, 2013.)

- 2 Center for Space Application Engineering and Technology. *From Wanhua to the Chinese Space Station*. Science Press. 2016.
(中国科学院空间应用工程与技术中心等编著. 筑梦天宫: 从万户飞天到中国空间站. 科学出版社. 2016.)
- 3 Space Station, https://en.wikipedia.org/wiki/Space_station
- 4 Space station, https://baike.baidu.com/item/Space_station
- 5 Manned space flight, <http://www.cmse.gov.cn/index.html>
- 6 Space competition, https://baike.baidu.com/item/Space_competition/4217448?fr=aladdin
- 7 Sputnik 1, https://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_1
- 8 Explorer 1, https://en.wikipedia.org/wiki/Explorer_1
- 9 Vostok 1, https://en.wikipedia.org/wiki/Vostok_1
- 10 Mercury-Redstone 3, https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury-Redstone_3
- 11 Space walk, https://baike.baidu.com/item/Space_walk/1717560?fr=aladdin
- 12 Apollo 11, https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_11
- 13 Salyut Programme, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_programme
- 14 Salyut, <https://baike.baidu.com/item/Salyut/7643609?fr=aladdin>
- 15 Skylab, <https://baike.baidu.com/item/Skylab>
- 16 spacecraft, <https://baike.baidu.com/item/spacecraft/315272?fr=aladdin>
- 17 Mir, <https://baike.baidu.com/item/Mir/3363499?fr=aladdin>
- 18 ISS, <https://baike.baidu.com/item/ISS/40952?fr=aladdin>
- 19 Salyut 1, https://baike.baidu.com/item/Salyut_1/12607423
- 20 Salyut 2, https://baike.baidu.com/item/Salyut_2/18872629
- 21 Salyut 3, https://baike.baidu.com/item/Salyut_3
- 22 Salyut 4, https://baike.baidu.com/item/Salyut_4
- 23 Salyut 6, https://baike.baidu.com/item/Salyut_6/9245283
- 24 Salyut 7, https://baike.baidu.com/item/Salyut_7/17509390?fr=aladdin
- 25 Salyut 1, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_1
- 26 Salyut 2, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_2
- 27 Salyut 3, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_3
- 28 Salyut 4, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_4
- 29 Salyut 5, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_5
- 30 Salyut 6, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_6
- 31 Salyut 7, https://en.wikipedia.org/wiki/Salyut_7
- 32 Mir, <https://en.wikipedia.org/wiki/Mir>
- 33 Space Shuttle, https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle
- 34 List of Mir Expeditions, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Mir_expeditions

- 35 List of Mir Visitors, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Mir_visitors
- 36 List of Human Spaceflights to Mir, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_human_spaceflights_to_Mir
- 37 List of Mir Spacewalks, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Mir_spacewalks
- 38 Skylab, <https://en.wikipedia.org/wiki/Skylab>
- 39 International Space Station, https://en.wikipedia.org/wiki/International_Space_Station
- 40 International Space Station, https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html
- 41 List of International Space Station Spacewalks, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_International_Space_Station_spacewalks
- 42 List of Human Spaceflights to the International Space Station, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_human_spaceflights_to_the_International_Space_Station
- 43 List of International Space Station Crew, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_International_Space_Station_crew
- 44 List of International Space Station Visitors, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_International_Space_Station_visitors
- 45 List of International Space Station Expeditions, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_International_Space_Station_Expeditions
- 46 Unmanned Spaceflights to the International Space Station, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unmanned_spaceflights_to_the_International_Space_Station
- 47 Shenzhou spaceship, https://baike.baidu.com/item/Shenzhou_spaceship/240018?fr=aladdin
- 48 Chinese space station, https://baike.baidu.com/item/Chinese_space_station/6287565?fr=aladdin



景海鹏 中国第一批航天员, 神舟九号、神舟十一号指令长, 神舟七号乘组航天员, 十九大代表。

(**JING Hai-Peng** The member of the China's first group of astronauts, the commander of "Shenzhou-9" and "Shenzhou-11", the

member of "Shenzhou-7" crew astronauts, and the representative of the 19th National Congress.)



辛景民 西安交通大学人工智能与机器人研究所教授, 现任中国认知科学学会副理事长, 中国自动化学会副秘书长。主要研究方向为统计与阵列信号处理, 模式识别。本文通信作者。

E-mail: jxin@mail.xjtu.edu.cn

(**XIN Jing-Min** Professor at the Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University. He currently serves as the Vice-President of the Chinese Society of Cognitive Science and the Deputy Secretary-General of the Chinese Association of Automation. His research interest covers the statistical and array signal processing, and pattern recognition. Corresponding author of this paper.)



胡伟 中国航天员科研训练中心副研究员, 主任设计师。主要研究方向为载人航天器在轨数据挖掘, 环控生保系统设计。

(**HU Wei** Associate researcher and director designer of China Astronaut Research and Training Center.

His research interest covers in-orbit data mining of manned spacecraft and the design of environmental control & life support system.)



邓一兵 中国载人航天工程副总师、研究员, 曾任中国航天员科研训练中心主任、航天员系统总指挥。主要研究方向为载人航天工程。

(**DENG Yi-Bing** Associate chief designer and researcher of China Manned Space Engineering, former director of China Astronaut Research and Training Center, former chief commander of astronaut system. His main research interest is manned space engineering.)