载人飞船型谱发展研究

何宇, 贾世锦, 石泳*, 邵立民, 高旭

中国空间技术研究院载人航天总体部, 北京 100094

* E-mail: shiyong@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2013-11-07; 接受日期: 2013-12-11

国家载人航天重大专项工程资助项目

摘要 我国“神舟”飞船已成功执行了十次飞行任务, 从“神舟十号”开始转入应用性飞行, 标志着我国已建成了功能完备的近地轨道载人天地往返运输系统. “神舟”载人飞船以三舱构型为基本型, 通过逐步补充和完善功能, 已形成了天地往返飞船、出舱活动飞船和交会对接飞船 3 种型谱, 具备执行近地轨道空间站天地往返运输任务, 也可根据需要开展出舱活动等近地轨道载人飞行的其他任务. 未来载人航天发展必须向超越近地轨道, 向更远的深空目标探索, 因此有必要尽快研制更安全、更可靠、能适应近地和深空多任务的新一代载人飞船.

关键词

载人飞船

型谱

新一代飞船

神舟飞船

1 引言

随着“神舟”飞船 10 次飞行任务的圆满成功, 我国第一代“神舟”载人飞船已突破了天地往返、出舱活动、交会对接等一系列载人航天技术. 在突破技术的同时, “神舟”载人飞船以三舱构型为基本型, 逐渐补充和完善功能, 形成了天地往返飞船、出舱活动飞船和交会对接飞船 3 种型谱.

我国载人航天“三步走”的发展战略已实施到第三步, 即“建造长期有人大型空间站”. 随着空间站的逐步建设, 空间站之后我国未来载人航天如何发展的新问题也随之浮出水面.

目前美国、俄罗斯等航天大国也在为未来载人航天发展方向争论不休, 尽管整体任务目标尚无定论, 但美俄等国已认识到一点, 那就是无论今后任务目标如何确定, 新型的载人飞船都是必需的, 因此他们已加快了新型载人飞船的研制, 并且取得了实质进

展, 预计 3~5 年将实现工程应用.

2 国外载人飞船发展型谱

2.1 联盟飞船系列型谱

苏联/俄罗斯联盟号系列飞船(Soyuz)作为世界上最早且至今仍在有效运营的载人飞船, 是载人飞船型谱化的成功典范. 自 1966 年首次设计完成以来, 经过 T, TM, TMA, TMA-M 等数次升级和更改, 其核心的三舱设计始终保持不变, 并基于这种设计衍生出了进步号无人货运飞船系列(Progress).

从船尾起, 联盟号飞船的三舱依次是: 非密封的推进舱, 为飞船的服务舱; 密封的返回舱, 承载航天员并作为飞船的指挥中心; 轨道舱, 包括居住设施、储物间、舱外活动的通道、两船间的转移舱段.

1966~1970 年, 以载人登月任务为导向, 通过 17 次飞行试验, 验证了第一代联盟飞船交会对接及舱

引用格式: 何宇, 贾世锦, 石泳, 等. 载人飞船型谱发展研究. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 229–234

He Y, Jia S J, Shi Y, et al. Research on the portfolio development of spacecrafts in China (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 229–234, doi: 10.1360/092013-1203

外转移的能力, 三舱构型设计基本定型, 累计在轨飞行超过 71 天, 是联盟系列载人飞船的先驱。

1971~1981 年, 联盟号载人飞船发展出第二代型谱, 承担地面至礼炮号空间站(Salyut)的天地往返运输任务。该系列联盟号载人飞船具备主动探测设备与目标的被动靶标配合, 交会系统移至飞船前端; 航天员可以打开舱门, 通过内部对接通道进入空间站; 对接期间的消耗品和生命保障用品由空间站提供, 使得生命保障系统得以简化。共有 33 艘第二代联盟飞船执行了载人和无人的礼炮号空间站的运输任务和单独的飞行任务, 累计飞行超过 1176 天。

自 1979 年起, 为满足第二代礼炮空间站的运输需要, 联盟飞船发展出了 T 系列型谱, 扩展了太阳电池翼, 可以支持 3 人乘组更长时间的飞行, 新增返回舱窗口外层玻璃, 能够在再入后抛掉, 提供更加清晰的视野。提升了飞行控制系统的自动化程度, 增加了航天员的控制面板。推进系统进行了重大改进, 将小推力姿态控制推进器完全与主推进系统结合, 推进剂由涡轮泵供给改为压力供给。该系列飞船具备以自动和手动方式向空间站往返运送航天员的能力, 具备无困难关机和在线恢复能力, 能够担当营救和回收任务, 并可运送航天员往返于两个空间站之间。联盟 T 系列飞船共发射 21 艘, 累计飞行时间超过 1195 天。

从 1986 年开始, 随着和平号空间站(Mir)的发射, 联盟飞船进一步改进为 TM 系列。与 T 系列相比, 其交会对接系统采用新型 Kurs 系统取代了传统的 Igla 系统, 采用了新的惯性控制系统, 配备了高精度的角速度和加速度传感器; 轨道舱增加了舷窗便于直观的观察对接过程, 飞船的伞舱系统得到显著改进, 总质量减小 140 kg, 增大了返回舱可用空间, 座椅更加舒适。推进系统进行了较大改进, 贮箱内采用了金属隔膜取代有机物隔膜。联盟 TM 系列飞船共执行 34 次飞行任务, 累计飞行 5500 余天, 为和平号空间站和国际空间站(ISS)初期运营提供了重要支持。

2002 年 10 月首飞的联盟 TMA 系列飞船对座椅、缓冲装置、着陆发动机、仪表进行了改进, 扩大了对航天员身高体重的适应范围。

2010 年 10 月首飞的联盟 TMA-M 系列是联盟飞船的最新版本, 采用了更先进的电子设备, 改进了温控、GNC 和在轨测量系统, 飞船平台进一步减重 70 kg。

除以上 4 次升级换代, 联盟飞船还根据特定的任务需求衍生出一些具有特殊功能的型谱, 比如联盟 4 号和 5 号轨道舱设计为具有泄复压功能的气闸舱, 在对接后, 航天员能够从联盟 5 号出舱, 通过出舱行走进入联盟 4 号; 联盟 13 号和 22 号在飞船前端分别安装了紫外相机和多光谱相机, 取代对接机构, 用来执行观测任务。此外, 早期的联盟飞船经改装还多次执行了军用任务。

综上所述, 联盟系列飞船自 1966 年首次设计完成以来, 三舱构型的基本设计始终保持稳定, 历经联盟 T, TM, TMA, TMA-M 四次升级换代, 衍生出货运飞船等多种适应不同任务需求的型谱, 可以满足执行载人和运货、军用和民用、近地轨道飞行和探月飞行、独立飞行和作为往返运输飞船为空间站提供补给等多用途使用需求。自 1971 年至今 40 多年连续安全飞行超过 100 次, 充分证明了其设计可靠性和安全性。

2.2 进步号货运飞船型谱

由联盟号载人飞船改造而成的进步号货运飞船是另一个重要的型谱分支。在联盟飞船基础上, 进步号将轨道舱改装为运送固体货物以及丢弃废弃物品的货物舱; 返回舱改装为非密封的燃料补给舱, 舱内容器中装载燃料和氧化剂, 通过货物舱外管路连接到飞船前端对接环, 在对接后运输至空间站贮箱; 推进舱与联盟号相比基本一致。

第一代进步号飞船(进步 1 号~42 号)采用化学电池作为独立电源, 不配置太阳电池翼。为满足和平号空间货运能力, 第二代进步 M 号飞船随联盟 T 和 TM 系列同步改进, 通过增加太阳电池翼使自主飞行时间增加到 30 天, 改进了 Kurs 交会对接系统, 主发动机配置也与联盟 TM 号相同。进步 M 号第 9 次飞行时, 安装了一个弹道式回收舱, 具备返回 150 kg 下行固体载荷能力。用于国际空间站的 M1 系列进步号飞船增加了 4 个贮箱, 可以携带更多推进剂。

自 1978 年起, 进步号通过运送固体货物、气体和液体、协助抛弃不需要的设备和垃圾, 维持了 4 个空间站的运行, 并支持了多次舱外活动和单独的实验。

2.3 阿波罗系列载人飞船型谱

与联盟号飞船同期, 同样是在载人登月计划的

牵引下,美国开发了指令舱-服务舱-登月舱三舱构型的阿波罗系列载人飞船(Apollo),首次实现了载人登月,至阿波罗 17 号共完成了 6 次完整的载人登月飞行^[1].在阿波罗计划结束后,由指令舱和服务舱组成的两舱构型阿波罗飞船还进行了 3 次与天空实验室(Skylab)的对接以及 1 次与联盟号飞船的对接.随后,航天飞机取代阿波罗飞船成为了新的天地往返运输器.2011 年航天飞机退役后,美国启动了多个商用载人天地往返运输系统的项目.

2.4 国外载人飞船型谱发展的启示

从国外载人飞船型谱发展可以得到如下启示.

1) 联盟号飞船历经 40 多年,始终坚持轨道舱-返回舱-推进舱的设计架构,通过不断的完善和拓展实现升级换代,衍生出多种适应不同任务需求的型谱系列,具有良好的延续性,可靠性不断积累,至今仍在有效运营.

2) 美国载人飞船发展阶段性特点明显,阿波罗飞船在太空竞赛后被航天飞机取代,航天飞机也将被新一代飞船取代,并未实现型谱化,继承性不足.

3) 从我国国情出发,我国载人飞船的发展应该坚持型谱化的发展思路,以“神舟”系列载人飞船为蓝本不断完善和拓展,以适应后续载人航天任务需要.

3 我国载人飞船型谱发展的总体思路

中国的载人航天于 1992 年立项,简称“921 工程”.在立项之初,结合当时的技术水平,并借鉴国际上的成功经验,按照循序渐进的原则,确定了三步走的发展战略.

第一步.通过发射几艘无人试验飞船和有人飞船,将航天员送入近地轨道并安全返回,建立天地往返运输系统.

第二步.研制和发射空间实验室,建立完整配套的空间站工程大系统,实现一定规模的空间应用.在本阶段要突破出舱活动和交会对接两大关键技术.

第三步.建造长期有人的大型空间站.

载人飞船按照发展战略,根据不同阶段的任务,逐项突破关键技术,并充分利用飞船的资源开展在轨科学实验以及后续技术的先期验证,形成神舟飞船的系列型谱.

1) 在工程的第一步,在主要突破天地往返技术的前提下,将轨道舱设计为具有留轨功能的舱段,开展在轨生物、化学和对地观测等科学实验,同时对后续空间实验室和空间站阶段的长期在轨相关技术进行验证.形成基本型神舟飞船.

2) 在工程的第二步,将轨道舱取消留轨功能,将轨道舱设计为兼具出舱活动功能的气闸舱,对空间站的出舱活动相关技术进行验证,形成出舱活动飞船.

3) 在工程的第二步,飞船增加交会对接功能,取消出舱活动功能,具备 3 人 5 天的独立飞行能力.形成改进型标准载人飞船,满足空间站天地往返运输的运营需求.

后续,在神舟飞船的基础上,发展出承载人数更多、飞行支持能力更长、可靠性安全性更高、能够执行载人深空探测任务的新一代飞船.

4 我国载人飞船型谱建立历程回顾

根据中国载人航天任务总体规划,“神舟”系列飞船以需求为牵引,引入了中国特色的型谱化设计理念.神舟飞船在轨道舱、返回舱和推进舱三舱基本构型基础上,通过更换整舱或子系统,满足不同的航天飞行任务需求,建立了执行载人飞行任务、出舱活动任务和天地往返运输任务共 3 个系列型谱,实现了“一船多型”和“一船多用”.

目前,“神舟”系列飞船已完成 10 次太空飞行任务,各次任务均取得了圆满成功,任务实施概况见表 1.

4.1 神舟载人飞船基本型

神舟一号至六号飞船主要面向载人空间飞行任务,实现航天员准确进入轨道,稳定舒适在轨运行和开展空间活动,安全健康返回地面.该系列载人飞船以建立三舱构型的基本型载人飞船为出发点.轨道舱作为生活舱,配备了航天员在轨工作和生活所需要的食品、饮水、卫生用品等.返回舱是飞船发射和返回过程中航天员所乘坐的舱段,也是飞船的控制中心.推进舱安装推进系统、电源、气瓶等设备,为飞船提供电力,进行姿态轨道控制.

为充分利用飞行试验机会,在轨道舱增加高精度对地观测相机,兼顾对地观测功能和留轨试验功能,

表 1 我国神舟飞船系列型谱发展情况

型谱	任务代号	发射日期	乘员人数	任务完成情况
载人飞船基本型	神舟一号	1999 年 11 月 20 日	无	在轨飞行 21 小时, 主要验证姿态与轨道控制、返回再入和回收着陆技术在轨飞行 7 天, 重点考核飞船环境控制和生命保障系统, 完成了轨道舱留轨试验
	神舟二号	2011 年 1 月 10 日	无	
	神舟三号	2002 年 3 月 25 日	无	在轨运行 6 天 18 小时, 全面验证载人环境控制等关键功能, 完成了对地观测和科学实验
	神舟四号	2012 年 12 月 30 日	无	在轨飞行 6 天 18 小时, 已完全具备载人飞行功能, 是载人飞行之前的全面预演
	神舟五号	2003 年 10 月 15 日	1	在轨飞行 21 小时, 航天员杨利伟首次进入太空并安全返回, 我国成为世界第 3 个掌握载人航天技术的国家
	神舟六号	2005 年 10 月 12 日	2	在轨飞行 7 天, 验证了多人多天的总体目标; 轨道舱留轨飞行 707 天, 取得了在轨试验数据和对地观测数据
出舱活动型载人飞船	神舟七号	2008 年 9 月 25 日	3	在轨运行 6 天 18 小时, 航天员翟志刚顺利完成出舱活动, 标志着我国已突破了出舱活动相关技术
改进型标准载人飞船	神舟八号	2011 年 11 月 1 日	0	在轨运行 17 天, 首次完成了与天宫一号目标飞行器自动交会对接
	神舟九号	2012 年 6 月 16 日	3	在轨运行 12 天, 完成自动和航天员手控交会对接, 完成了 3 人 10 天组合体驻留, 标志着我国已突破并掌握交会对接技术
	神舟十号	2013 年 6 月 11 日	3	在轨运行 15 天, 完成首次天地往返运输应用性飞行任务, 首次开展了太空授课活动

在神舟六号飞行任务中实现了多人多天在轨飞行、高精度对地观测和轨道舱长期留轨运行, 验证了低轨长寿命相关技术和航天器长期运营管理技术。

神舟一号至六号飞船任务的成功实施, 确立了三舱构型的 8 t 级神舟载人飞船基本型, 为后续载人飞船型谱化拓展设计建立了良好的基础(图 1)。

4.2 出舱活动载人飞船

神舟七号飞船轨道舱增加气闸舱功能, 实现了 3 人满载空间飞行, 并突破了出舱活动技术, 验证了天基通信技术, 释放了科学实验微小卫星, 实现了“神舟”系列载人飞船“一船多型”和“一船多用”的技术跨越, 开发了以泄复压系统、舱外服支持系统为代表的一大批新技术, 积累的工程经验和成果可应用于我国空间站研制(图 2)。

4.3 交会对接载人飞船

神舟八号至神舟十号飞船在载人飞船基本型基础上, 增加了交会对接功能, 形成了改进型标准载人飞船(图 3)。

改进型标准载人飞船通过在轨道舱配置对接机构、交会测量敏感器和货物运输功能, 在返回舱增加手控交会控制功能, 在推进舱增加平移发动机, 使载人飞船具备了与目标飞行器交会对接和天地往返运输的能力。

图 1 (网络版彩图)天地往返载人飞船外形

图 2 (网络版彩图)出舱活动载人飞船外形

图 3 (网络版彩图)交会对接载人飞船外形

神舟八号、神舟九号和神舟十号完成了与天宫一号目标飞行器 3 次交会对接任务, 标志着改进型标准载人飞船与运载火箭等系统已形成了功能完备的载人天地往返运输系统, 为我国近地轨道空间站的建造和运营奠定了坚实基础。

5 未来载人飞船发展方向

5.1 国外新型载人飞船发展及启示

近年来, 美俄等国虽然在载人登月、载人深空探测等任务目标上举棋不定, 但均认识到无论任务目标选择何处, 都需要尽快研制新一代载人飞船, 因此美俄等国均在大力开展新一代多用途飞船的研制工作, 并已取得相当进展, 预计未来 3~5 年将具备应用飞行能力(表 2)。

从国外在研新型载人飞船的发展趋势来看, 一方面大大提高了载人飞船的性能, 乘员人数集中在 6 人左右, 飞行时间 1 周至 2 年不等; 另一方面大多数采用传统的火箭发射和降落伞回收模式, 返回舱选用钝头体外形, 目的是技术成熟、更安全可靠。

另外政府主导的项目以兼顾深空探索的多用途为主, 目的是引领技术, 而商业背景计划^[5](天龙、CST-100、追梦者均为 NASA 支持的商业开发项目) 全部是服务于低轨运输任务, 目的是降低技术和市场风险^[6]。

未来载人天地往返运输技术竞争的关键因素和指标是安全风险和成本, 竞争的关键技术是部分重

复使用技术。

5.2 我国未来载人飞船发展方向

我国现有的 3 种载人飞船型谱均以执行近地轨道任务为目标, 不能适应载人登月、载人登小行星等深空探测任务, 特别是不具备第二宇宙速度返回能力。随着载人航天技术的快速发展, 也使得载人登月与建立月球基地、火星、小行星等载人深空探测任务成为可能, 对新一代载人飞船的需求也非常迫切。另外, 未来几年我国空间站建成后将开展大量空间应用试验, 也需要建立具备更强人员往返运输能力和载荷下行能力的天地往返运输飞船, 进一步扩展空间站的应用领域和范围, 增加空间站运营管理的灵活性和适应性。

参考国外的发展趋势, 结合我国航天技术基础, 新一代载人飞船型谱研制应着重考虑以下方向。

1) 适应多任务。既可执行载人登月、载人登小行星等深空探索任务, 引领技术发展, 又要兼顾近地轨道空间站运输任务, 特别是提高空间站任务的下行能力。

2) 需大幅提高载人飞船的运输性能。乘员人数应当在 3~7 人, 可支持 2~3 年的停靠飞行, 具备 500 kg 的货物下行能力。

3) 载人航天始终要将乘员安全放在首位^[5]。国外“天龙”、CST-100、追梦者采用了自备动力逃逸技术, 避免了重型逃逸塔分离时风险高、逃逸方向可控性不强等缺点^[7], 提高了乘员安全, 可充分借鉴。

表 2 国外在研新型载人飞船主要性能参数

项目	美国				俄罗斯
	MPCV ^[2]	“天龙”	CST-100	追梦者 ^[3]	PPTS ^[4]
质量 (t)	21.2	4.9 (干重)	13.5	11.3	12.7
返回舱外形	钝头体	钝头体	钝头体	升力体	钝头体
飞船长度 (m)	—	6.1	5.03	9	—
返回舱大底直径 (m)	5.02	3.7	4.56	7 (翼展)	4.4
乘员人数	2~4	7	7	7	4~6
生活空间 (m ³)	8.95	7~10	—	16	10
载荷能力 (kg)	—	6000	1164	1500	800
适用任务	近地、深空	近地	近地	近地	近地、深空
任务周期	21 天	1 周~2 年	210 天停靠	210 天停靠	30 天
发射方式	火箭发射	火箭发射	火箭发射	火箭发射	火箭发射
回收方式	降落伞回收	降落伞回收	降落伞回收	水平滑翔着陆	降落伞回收
逃逸方式	逃逸塔	自带动力逃逸	自带动力逃逸	自带动力逃逸	逃逸塔
回收区	海上	海上	陆上	陆上	陆上
是否可重复利用	是(10 次)	是	是(10 次)	是	是(10 次)
运输成本	2 亿美元(发射成本)	1500 (万美元/人)(估算值)	1300 (万美元/人)	20~30 (万美元/人)	—

4) 进一步降低运输成本. 重复使用是降低成本的有效途径之一, 国外目前在研新型飞船均从不同程度上采用重复使用技术.

6 结论及建议

我国通过“921 工程”二十多年的实施, 已经形成了神舟载人飞船基本型、出舱活动载人飞船、改进型标准载人飞船 3 种型谱, 为我国近地轨道空间站建设和运营奠定了坚实基础, 也为我国进一步探索和利用空间积累了丰富的经验.

未来我国载人航天发展不能只停留近地轨道上, 必须探索和开发更远的目标, 无论未来探索目标确定在何处, 都迫切需要承载人数更多、飞行支持能力

更强、可靠性安全性更高、能适应多任务的新一代载人飞船.

我国神舟系列载人飞船型谱从开始研制已经晚了美俄等航天大国近 30 年, 尽管我国加紧了研制步伐, 也取得了举世瞩目的成就, 但也只达到国外 30 年前的水平. 目前国外新型载人飞船还处于研制阶段, 尚未正式应用, 我国从现在开始启动新一代载人飞船的研制, 在飞船功能和性能上与国外新型载人飞船保持同一水平, 可迎头赶上美俄等国, 大大缩小差距.

结合我国国情, 新一代载人飞船的研制应立足于适应多任务, 采用可重复使用等技术降低成本, 还应考虑采用自备动力逃逸等新技术进一步提高乘员安全性和运行可靠性.

参考文献

- 1 Woods W D. 李平, 董光亮, 孙威, 译. 阿波罗是如何飞到月球的. 北京: 清华大学出版社, 2012
- 2 Emre K. Crew exploration vehicle (CEV) skip entry trajectory. ADA483248, 2008
- 3 Zachary K. Dream chaser commercial crewed spacecraft overview. In: 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. San Francisco, 2011
- 4 武尧尔. 俄罗斯全力打造新型载人飞船. 太空探索, 2011, 2: 30-33
- 5 Mango E J. Human spaceflight safety for the next generation of orbital space systems. KSC-2011-272, October 17, 2011
- 6 Richard W R. Commercial crew program overview. KSC-2011-279R, January 31, 2012
- 7 Owens D B, Aibicjpm V V. Overview of orion crew module and launch abort vehicle dynamic stability. AIAA Paper 2011-3504, 2011

Research on the portfolio development of spacecrafts in China

HE Yu, JIA ShiJin, SHI Yong, SHAO LiMin & GAO Xu

Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Represented by the first application mission of Shenzhou-10, Shenzhou spacecraft has become a fully functional transportation system between LEO and the earth after ten continues successful missions. Based on the three modules design, three types of functional portfolio have been established including transportation, EVA and RVD. Required by the manned mission beyond LEO in future, it is necessary to develop a new spacecraft with more safety and reliability, which is adapted to new missions in deep space.

spacecraft, portfolio, next generation of spacecraft, Shenzhou spacecraft

doi: 10.1360/092013-1203