

# 美国载人探索飞船计划综述

石培新

(中国国防科技信息研究中心)

**摘要** 介绍美国载人探索飞船重大载人航天计划产生的背景、总体目标和方案构想、飞船各分系统组成与关键技术以及计划的最新进展情况,总结载人探索飞船的先进技术理念。

**关键词** 美国 载人探索飞船 方案构想 关键技术 战略规划

## 1 计划产生背景

进入新世纪以来,美国在空间技术领域已经取得绝对优势。为了保持和扩大这种技术优势,巩固美国在空间领域的领导地位,新世纪美国的空间政策要求美国建设强大高效的太空能力,使美国商用太空的太空系统比国际竞争对手领先一代,美国政府的太空系统比国际竞争对手领先两代,通过发展载人航天等项目开发先进的军事太空技术。

2004 年 1 月 14 日,即在“阿波罗”探月计划结束 30 多年以及“哥伦比亚”号航天飞机失事 1 年后,美国总统布什提出“太空探索新构想”。在“太空探索新构想”中,提出航天飞机将在完成国际空间站的组建工作后退役,美国要研制一种新型载人飞船——载人探索飞船(CEV),以承担未来美国载人登月球、登火星的重任。

2004 年 6 月,“美国太空探索政策执行委员会”提交了题为“激励、创新、发现之旅”的报告。该报告完全支持“太空探索新构想”,认为这是自“阿波罗”时代以来美国最雄心勃勃的无人和载人太空探索构想,对美国维护其技术领先地位、经济活动以及国家安全具有重大意义。

2005 年 9 月 19 日,美国国家航空航天局局长正式公布了美国重返月球计划。根据计划,美国国家航空航天局将于 2018 年再次实现载人登月。

## 2 总体目标及方案构想

为明确载人探索飞船计划的总体目标,美国国家航空航天局将载人探索飞船计划按不同能力要求,定义了三个“螺旋”式渐进发展阶段:

**螺旋 1 阶段** 要求具有必要的太空能力,将用于载人飞行操作的太空运输系统送到低地球轨道,并在 2014 年前具备无人探索月球环境的能力。在螺旋 1 阶段采办的载人运输系统将成为螺旋 2 阶段系统中的系统。

**螺旋 2 阶段** 要求具有必要的太空能力,在 2015 年至 2020 年之间,执行载人探月和无人探测火星任务。

**螺旋 3 阶段** 执行长期的载人探月和无人探测火星任务,要求发展广泛的月球表面系统(如栖息和表面电源系统),以及载人运输系统的长期月球附近停泊能力。

载人探索飞船系统包括飞船本身、月球着陆器(LSAM)、地球飞离级(EDS)及航天飞机衍生型运载火箭。载人探索飞船系统在执行登月任务的过程大致可以分为 6 步:

第一,“阿瑞斯 5”重型运载火箭承载着月球着陆器发射升空,并将其送入地球轨道。随即载人探索飞船由“阿瑞斯 1”运载火箭发射升空并进入地球轨道;

第二,载人探索飞船与月球着陆器和“地球飞离级”在预定轨道对接,对接后利用“地球飞离级”提供的动力进入环月轨道;

第三,航天员离开载人探索飞船,乘坐月球着陆器着陆到月球表面,此时载人探索飞船仍留在环月轨道上飞行;

第四,航天员结束月球考察后乘坐月球着陆器上部的飞行舱返回环月轨道与载人探索飞船对接;

第五,航天员进入载人探索飞船后,抛掉着陆器飞行舱,准备返回地球;

第六,载人探索飞船利用降落伞和气囊降至加州的爱德华兹空军基地,同时也有可能降落在水面。

### 3 系统组成与性能

如前所述,载人探索飞船系统包括“猎户座”飞船、月球着陆器、地球飞离级及航天飞机衍生型运载火箭。

#### 3.1 “猎户座”飞船

“猎户座”飞船由以下分系统构成:

(1)电子分系统 包括软件、计算机和其它能监视和控制载人探索飞船电气和机械系统的电子系统。电子分系统包括所有具有以下功能的硬件和软件部件:飞行软件、指挥和数据处理、通信与跟踪、计算机显示与控制、以及控制外部接口所需的所有接口。

(2)电力分系统 包括发电装置、电能存贮和电力分配与控制等。

(3)机械分系统 包括发动机驱动器件、接插件,以及用于完成飞船对接和停泊、执行运动功能或维持配置所需的相关部件。

(4)无源热控和热防护系统 包括能防护飞船热性能的系统,如瓷片等。

(5)结构分系统 包括以下部件:主结构、次结构以及所有飞行器设备(包括负载、动力学、应力分析等)的结构部件。

(6)推力系统 包括用于轨道机动、脱轨机动、姿态控制等推力部件,执行逃逸和着陆活动所需的推进系统也包括在该分系统中。

(7)舱外活动保障系统和载人生存设备子系统 包括一些舱外活动保障系统,如航天服/脐带接口、飞行器加压/减压系统接口、计算机显示与控制、对舱外活动舱盖设计、机械和外部约束和机移动辅助等的支持。该分系统还包括乘员应急逃逸、生存设备系统/装置,如加压航天服接口,航天员着陆后跟踪系统,航天员通信系统等。

(8)环境控制和生命保障(ECLS)系统 包括用于环境控制和生命保障(ECLS)、有源热控制、医疗系统和饮食住宿的飞船分系统,该分系统提供以下功能:呼吸气体;应急用氧气;污染控制;饮用水和非饮用水;废物和垃圾收集、存储、处理;火灾探测与扑救;舱压、温度与湿度;热采集、传输与隔离;仪器与座舱有源热控制;食品供应、处理、准备和存储;环境监测;医疗系统(其中包括航天员健康与对抗措施系统)。

(9)航天员健康和饮食住宿系统 包括航天员“座位”,内部约束与移动辅助装置,卫生系统,私人

住所,睡眠系统,常温存贮系统,维修系统,原地训练系统,内务管理系统,服装,照明系统,航天员锻炼、放松和娱乐系统,存储系统等

(10)火工品分系统 包括爆炸作动装置和系统的设计、研制、生产、试验与鉴定。火工品、爆炸物和推进剂都是能够进行快速化学转换或分解,并产生大量气、热的物质。他们包括燃料和氧化剂,可以采用电气、机械或激光能量点燃。

(11)制导、导航与控制(GN&C)分系统 包括与制导、导航和控制相关的各种设计、需求分析、接口描述、性能分析电能,以及用于射频导航设备的硬件,交会对接系统的跟踪器件。

(12)接线分系统 包括所有分系统之间的连线,保证飞船的完整性。

(13)逃逸分系统 该分系统用于在飞船的上升、入轨和下降过程中为航天员提供一种生存方式。

#### 3.2 衍生型运载火箭

为了实现美国新空间探索计划的目标,美国国家航空航天局对多种发射载人探索飞船的运载火箭方案进行了研究,其中包括“宇宙神 5”和“德尔它 4”火箭的改进型、航天飞机衍生型以及可重复使用运载火箭等方案。最终决定以大推力、高可靠性的航天飞机推进部件为基础研制美国下一代运载火箭——航天飞机衍生型运载火箭,包括“阿瑞斯 1”载人和“阿瑞斯 5”载货两种运载火箭。

##### 3.2.1 “阿瑞斯 1”运载火箭

“阿瑞斯 1”运载火箭主要用于发射飞船,为二级运载火箭,长 94.2m,起飞重量 907t,低地球轨道运载能力为 25t。火箭采用串联式设计,第一级可重复使用,为一个 5 段式的航天飞机固体火箭助推器,直径 3.7m,固体推进剂为聚丁二烯·丙稀腈(PBAN),推力大于现役航天飞机使用的 4 段式航天飞机固体助推器。第二级(上面级)为一个全新的低温级,直径 5.5m,采用铝锂结构,包括仪器舱、级间段、控制火箭第一级翻转飞行的反作用控制系统以及电子设备系统。第二级由一台 J-2X 发动机提供动力,推进剂为 127t 的液氢/液氧。J-2X 为两种历史型号 J-2 和 J-2S 发动机的改进型。其中,J-2 为“阿波罗”计划中“土星 1B”和“土星 5”火箭的上面级发动机,经过了多次飞行验证;J-2S 为一个经过简化的型号,在 20 世纪 70 年代初研制成功并通过飞行试验,但从来没有正式飞行过。

“阿瑞斯 1”发射载人飞行器有着较高的安全性。

火箭采用了串联式设计并且在火箭的顶部安装了逃逸系统。逃逸系统安装在飞船的上方,火箭在发射和上升段的任意位置出现问题时,航天员都可以迅速地乘坐逃逸系统与飞行器分离返回地面,相比之下,航天飞机的逃逸系统却并不是在发射和上升段的任意位置都起作用的。此外,由于飞船处于火箭的顶部,避免了火箭碎片给飞船带来损伤的可能。根据测算,现有航天飞机在发射和上升段的失败率为 1/200,而“阿瑞斯 1”发射飞船的失败率仅为 1/2000。“阿瑞斯 1”起飞后利用第一级动力飞行 150s,飞至 61km 高度时马赫数达到 6.1。第一级发动机燃料耗尽后与火箭第二级分离。第二级发动机点火并将飞船送至 101.4km 的高空,此时第二级分离,飞船服务舱推进系统将自身推进至距地面 297.7km 高的圆轨道。进入轨道后,飞船将与国际空间站自动对接或与月球登陆器和“地球飞离级”对接后飞向月球。

### 3.2.2 “阿瑞斯 5”运载火箭

“阿瑞斯 5”运载火箭长 109m,起飞重量 3357t,低地球轨道运载能力 130t,月球轨道运载能力 65t。火箭采用两级结构。第一级将由航天飞机外贮箱改进而来,直径 10m,使用 5 台 RS-68 氢氧发动机(“德尔它 4”火箭主发动机)提供动力。捆绑两枚可重复使用的 5 段式航天飞机固体助推器,与“阿瑞斯 1”火箭第一级的固体助推器相同。第二级又被称为“地球飞离级”,与“阿瑞斯 1”火箭第二级相同,由 NASA 下属的马歇尔航天中心负责设计。

“阿瑞斯 5”火箭采用复合材料整流罩,内部装有月球登陆器。执行重返月球任务时,“阿瑞斯 5”起飞后,第一级动力系统将火箭推至近地轨道。第一级分离后,第二级(地球飞离级)发动机点火,将月球登陆器推进至圆轨道。在圆轨道飞行过程中,“地球飞离级”和月球登陆器将与由“阿瑞斯 1”发射的飞船对接,对接后“地球飞离级”发动机点火,“猎户座”飞船和月球登陆器一起飞向环月轨道。

### 3.3 月球着陆器

月球着陆器由上升级、下降级和一个着陆舱组成。月球着陆器的上升级与下降级能够支持 4 名航天员在月球表面着陆 7 天,并将航天员从月球表面运送到月球轨道。

上升级采用一个加压的液氧/甲烷推进系统,使月球着陆器由月球表面上升到月球圆轨道上,与飞船实现交会对接。上升级采用一个 44.5kN 的上升推

进系统发动机和 16 个 445N 用于飞行器机动和姿态控制的反作用系统推进器。

着陆舱是一个内部气锁的加压密封舱,航天员可以在加压密封舱内穿上出舱活动服,然后着陆舱减压,航天员出舱活动。

下降级用于将飞船降落到月球表面,并在 7 天的月球表面活动中为飞船提供生命保障和电力产生能力。下降级采用一个泵浦液氧/液氢推进系统,执行月球轨道插入和从 100 km 的月球圆轨道下降任务;4 个 66.7kN 下降推进系统,用于飞船机动;反作用控制系统,用于飞船姿态控制。

### 3.4 地球飞离级

在执行重返月球计划的任务中,需要用一个地球飞离级将飞船和月球登陆器从地球轨道推进至环月轨道。整个火箭的低地球轨道运载能力为 125t,虽然这一设计主要用于载物,但是如果加以改进,该火箭也可以用于人员的运送。有了专门载物的设计,NASA 就能够将 21t 重的有效载荷送入月球表面。

## 4 关键技术

### 4.1 推进技术

为了在地面处理、发射和空间操作中尽量做到安全,需要尽量选择无毒推进剂;需要发展较大的无毒单元推进剂推进器,并对运载火箭上面级、航天员舱、月球着陆器进行评估;支持无毒推进剂的特种推进研究,包括研究和演示技术,确保运载火箭上面级的反作用控制系统(RCSs)从肼变成无毒推进剂,确保安全/高效的发射操作、基础设施简化、性能改进,以及主推进剂与辅助推进剂的通用化;需要发展先进的姿态控制推进器,以及 50-100 磅推进器,支持飞船航天员舱和其他应用;需要为服务舱开发高比冲(Isp)推进系统,确保登月时具有高可靠性,不出现严重的推进剂汽化损耗;需要评估为服务舱和月球着陆器升级开发的 5-20 千磅压力/泵浦液氧/甲烷空间发动机和推进系统。

### 4.2 热控制技术

必须为飞船有源热控制分系统(ATCS)和飞船所有其他的分系统提前选择热传送流体,因为硬件设计是随流体而定的。热控制流体不仅需要具有良好的热物理性能,而且要求在飞船的密封舱和散热器中使用热控制流体是安全的。流体必须无毒、不易燃、能与环境控制和生命保障系统兼容,并具有允许在散热器中使用的冷冻温度。月球表面的热

环境与深空的热环境有很大不同, 灰尘、月球表面操作以及飞船组装等因素的影响必须综合考虑到热系统的设计中。

#### 4.3 防护技术

防护包括热防护、辐射防护、月球灰尘/环境保护等。防护是确保任务成功和安全的关键。热防护系统(TPS)要求设计的材料能承受飞船在超高音速再入大气层时产生的气动热。目前, 大家公认的空间的主要辐射源是银河宇宙射线(GCRs)和太阳粒子事件(SPEs), 但是, 由于存在一些与这些辐射源不相关的其他因素, 使得长期任务的屏蔽保护不确定化。因此, 需要进行深入研究, 要求能够非常确定地预测各种材料和航天器部件的抗辐射屏蔽能力, 并研究航天员抗辐射的极限能力。

洛克希德·马丁公司提交的载人探索飞行提案中, 采用了波音 787 飞机的电子设备和美国国家航空航天局“星尘”号样本返回舱热防护系统(TPS)材料。霍尼韦尔公司将提供波音 787 飞机的电子设备, 将使航天器更耐辐射, 并能够适应热、真空和振动环境。“星尘”号返回舱材料采用酚醛浸渍碳烧蚀材料(PICA), 由美国国家航空航天局艾姆斯研究中心研发。

#### 4.4 先进的电子设备和软件技术

在载人探索飞船计划中, 要求采用比目前国际空间站和航天飞机计划中更先进的一体化系统健康管理 and 自主技术, 通过增强自主能力增强航天员的安全和飞船的性能, 通过增强诊断能力和任务支持能力来降低操作费用。

空间和月球表面的辐射环境会使飞船电子设备在许多情况下失效。需要进行深入研究, 使电子设备的电路设计和/或屏蔽在这种环境中更加健壮。目前载人系统有几公里长的导线, 数据总线是在几十年前设计的。有必要研发和采用先进的航天员飞行器网络解决方案, 增强可靠性和稳健性, 降低系统的质量和体积。

载人探索飞船计划要求有很高的数据率通信, 支持空间和月球表明操作。在登月任务中, 有时需要在月球极地陨坑中的一些长期黑暗地区工作, 需要有低温电子设备, 确保传感器、探测器、机器人以及大型机械设备进入陨石坑的阴暗面后正常工作。

“猎户座”飞船要与国际空间站和低地球轨道上的月球着陆器实现交会对接。这需要对飞船的位置、速度、加速度、姿态和姿态速率进行测量和估算, 需

要有精确着陆和危险规避能力。

#### 4.5 环境控制与生命保障技术

在国际空间站和航天飞机上曾使用过环境控制与生命保障系统, 但该系统庞大, 性能不可靠。需要进行深入研究, 降低系统的质量和体积, 增强其性能可靠性和在月球表面环境的生存能力。在载人探索飞船计划中, 要求有气体管理技术投资, 主要是为了(1)采用先进的包装和规划, 改进氢氧化锂(LiOH)的体积功效;(2)降低气体再生系统的质量、体积、热和能量需求;(3)鉴别/开发经改进的吸附剂;(4)开发低维护技术, 清除行星尘埃等颗粒物;(5)开发使着陆器与外部灰尘污染隔绝的技术和方法;(6)改进多功能二氧化碳、湿度和微量元素污染系统的性能。

### 5 计划进度安排与研制进展情况

#### 5.1 计划进度安排

根据美国国家航空航天局对载人探索飞船的研制进度规划如下:

- 2008 年-2010 年, 飞船在地球轨道进行首次无人飞行;
- 2011 年 6 月, 飞船在地球轨道进行首次载人飞行;
- 2015 年-2018 年, 月球着陆器在月球轨道进行首次无人飞行;
- 2016 年-2016 年, 月球着陆器进行首次载人飞行;
- 2018 年, 飞船/月球着陆器联合体进行首次载人登月;
- 2020 年, 开始载人火星登陆计划。

载人探索飞船的研制将分两批进行, 具体分为以下三个步骤:

第一步, 第一批飞船应尽快具有近地轨道的飞行能力, 以避免目前计划中出现的航天飞机 2010 年退役而飞船要到 2014 年才能投入使用的断档期, 载人数量将达到 4 名~6 名。第一批飞船还可以作为国际空间站的载人返回飞行器, 乘载 3 名以上的航天员。这一步将于 2010 年完成。

第二步, 第二批飞船应具有在行星际持续飞行数月的能力, 新型飞船应与第一批飞船保持同样的基本配置, 并在此基础上研制其他一些特定的舱段或模块, 例如“居住舱”、“实验室”、“推进模块”以及“可消耗单元”来支持长期飞行。

第三步,完成载人着陆器的研制,实现登月与登陆火星目标。在第二批任务完成之后,月球和火星着陆器的研制工作也可以同时展开,并且还能够参考第二步中探索 4 个目的地时所获取的经验。着陆任务将于 2020 年开始。

## 5.2 实际重大进展情况

2006 年 6 月 5 日,美国国家航空航天局宣布对 10 大研发中心在 2014 年前的工作进行了任务分工:格伦研究中心负责研发飞船服务舱,提供 6 人生活的舱段的主推进系统,还负责研制飞船适配器,用来使航天器与运载火箭匹配;艾姆斯研究中心将领导飞船热防护系统的早期研发工作,帮助美国国家航空航天局选择热防护罩方案,并负责满足相关的信息技术需求;德来顿飞行研究中心负责研制飞船发射中止系统,发射失败时发射中止系统使飞船与火箭分离;兰利研究中心将对飞船承包商开发的发射中止系统进行监督和独立分析;约翰逊航天中心将负责飞船的总体工作;马歇尔航天飞行中心领导“乘员运载火箭”(CLV)的研发,并管理月球机器人计划;斯坦尼斯航天中心负责试验载人运载火箭与载货重型运载火箭的发动机;肯尼迪航天中心将负责飞船的发射和地面操作,协助美国国家航空航天局规划和准备航天飞机后续发射与运营;戈达德航天飞行中心负责研发通信、导航、电子设备;喷气推进实验室将与戈达德中心共同负责相关的系统工程、综合软件及电子设备的研发工作。

2006 年 8 月 31 日,美国国家航空航天局探索系统任务委员会宣布,选择洛克希德·马丁公司团队设计建造“猎户座”飞船,合同总价值 80 亿美元。

## 5.3 进展评估

到目前为止,载人探索飞船计划的各分系统取得了不同程度的进展,但总体来说,整个计划仍处于研发阶段。

2006 年 7 月 26 日,美国总审计局(GAO)公布了一份报告,对美国国家航空航天局载人探索活动作出评估。总审计局认为,美国国家航空航天局目前的载人探索飞船采办策略存在成本大幅超支、日期延

迟、性能不足的风险。因此总审计局建议美国国会考虑限制年度拨款。对此,NASA 表示要修订当前的载人探索飞船采办政策。从目前的发展态势来看,如果载人探索飞船计划进展缓慢,航天飞机还将在未来的一段时间内继续作为承担国际空间站载人飞行的主力,有可能要延续到 2010 年以后。

## 6 结束语

载人探索飞船计划是美国继“阿波罗”探月计划和航天飞机计划后又一个重大的载人航天计划,投资将达 1000 多亿美元,代表着未来载人航天技术发展的重大方向。通过发展载人探索飞船计划,美国能够通过发展民用空间关键技术带动军用空间关键技术的突破,为其保持空间技术领先优势打下坚实的基础。与以往的载人航天计划不同,载人探索飞船计划采取载人与载货分离发射、在空间轨道组装的新概念。这种概念能在将风险降低到最低的前提下充分提高系统的效费比,体现了美国当前最先进的空间技术发展理念。载人探索飞船各系统采用了目前世界上最先进的技术。◇

## 参 考 文 献

- [1] The Vision for Space Exploration. February 2004. NASA.
- [2] NASA's Exploration Systems Architecture Study Final Report. November 2005. NASA-TM-2005-214062.
- [3] Skip Hatfield. Project Orion Overview and Prime Contractor Announcement. August 31, 2006
- [4] NASA 为十大中心分配 CEV 项目任务. 国防科工委网. 2006,6,6.
- [5] NASA 宇航员办公室定义 CEV 座舱. 中国航天信息中心. 2006,6,18.
- [6] 曲佳,钱钱.NASA 可能将缩减 CEV 的尺寸. 中国航天工程咨询中心. 2006,03,15.
- [7] 美研制新型 CEV 载人航天器. 中国船舶信息中心. 2006,06,02.
- [8] 美国宇航局新一代登月航天器形似阿波罗. 北京科技报专题. 2006,04,25.
- [9] 江燕. 新运载器将植根于航天飞机. 中国空间技术研究院. 2005,09,26.