

# SpaceX 公司星舰航天器载人深空探测任务浅析

赵毓, 王平, 侯振东, 彭超然, 余欢  
(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 针对星舰航天器载人深空探测任务, 概述了系统基本情况, 介绍了 SpaceX 公司针对该系统支持载人月球、载人火星探测任务的初步方案, 分别对星舰航天器飞行期间和星表停留期间的能力及性能需求进行分析, 考虑实际工程情况估算了任务规模并总结了关键技术, 最后针对载人深空探测提出了几点思考与建议, 可为后续工程规划及方案论证提供参考。

**关键词:** 载人航天; 航天器; 载人月球探测; 载人火星探测; 星舰

## Analysis of Manned Deep Space Exploration of SpaceX's Starship Spacecraft

ZHAO Yu, WANG Ping, HOU Zhendong, PENG Chaoran, YU Huan  
(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Aiming at the manned deep space exploration mission of the Starship spacecraft, the basic facts of the system is outlined, and the preliminary plan of SpaceX for the system to support future manned lunar and Mars exploration missions is introduced. The capability and performance requirements of the Starship spacecraft in the flight phase and during its stay on the surface of other celestial bodies are analyzed respectively. The scale of the mission is estimated considering the actual engineering situation and key technologies are summarized. Finally, some thoughts and suggestions are put forward for manned deep space exploration, which can provide reference for subsequent project planning and program demonstration.

**Key words:** Manned space flight; Spacecraft; Manned lunar exploration; Manned Mars exploration; Starship

### 0 引言

北京时间 2023 年 4 月 20 日, SpaceX 公司实施了超重 - 星舰组合体的首次入轨测试发射, 如图 1 所示; 组合体在起飞 239s 后由于姿态失控导致自控爆炸。5 月 4 日, 美国政府以爆炸碎片破坏性过强为由, 决定暂时禁止星舰系统继续试飞。此次飞行试验虽然未能验证星舰 (Starship) 航天器的轨道飞行能力, 甚至造成后续发射任务延期, 但是仍可认为是正式拉开了 SpaceX 公司星舰航天器载人深空探测任务的序幕。

星舰系统采用“器箭一体化”设计, 目的是将卫星、有效载荷、人员和货物运送到各种轨道以及地球、月球或火星着陆点, 终极目标是将人类与载荷送往火星并建立基地。为满足不同飞行任务目标, 星舰航天器可分为测试版 (原型机)、月球版、火星版、货运版和加油版等多种类型, 其中月球版和火星版为载人飞行器。本文旨在从技术角度对星舰航天器执行载人深空探测任务情况进行初步分析。



图 1 超重 - 星舰组合体首飞状态  
Fig. 1 The first launch status of the Superheavy and Starship system



图2 载人星舰（左）和非载人星舰（右）构型示意图  
Fig. 2 Starship crew(left) and uncrewed(right) configurations

## 1 系统概述

2015年, SpaceX公司创始人马斯克首次提出BFR重型运载火箭概念, 随后10余年内方案几经技术迭代, 到2018年末才正式宣布将该重型运载系统命名为“星舰系统”<sup>[1]</sup>。星舰航天器是星舰系统的第二级, 可完全重复使用, 当前设计高度约50 m, 直径约9 m, 采用低温液氧/甲烷推进剂, 推进剂容量约1200 t, 干质量约120 t, 载荷容量约100~150 t, 配有3台海平面版猛禽2(Raptor 2)发动机和3台真空版猛禽2发动机, 总推力约14700 kN。

星舰航天器研制主要分为地面试验和飞行试验两部分, 当前处于飞行试验的高空试验阶段。星舰航天器地面试验包括: 贮箱环境及低温压力试验、发射前演练试验、系留点火试验和静态点火试验; 飞行试验包括: 百米级低空飞行试验、十公里级高空飞行试验和轨道飞行试验。

星舰航天器原型机可谓是在一路“爆炸试验”中不断改进而生, 从2020年2月的首枚原型

机SN1在压力测试中爆炸, 到如今试飞的原型机SN24, 测试版星舰已经爆炸了10余次。这正体现了星舰航天器设计的“快速试错”理念, 区别于国家主导航天系统工程“一次做对”的设计方法, 商业化星舰设计过程更像是互联网行业通过试错找漏洞的过程。SpaceX公司认为, 通过多次快速迭代可以减少设计阶段投入的时间和精力, 便于准确定位关键问题并加以解决, 进而从整体上降低设计成本。

## 2 任务分析

星舰航天器设计初衷是搭载数百人完成火星移民计划。随着近年美国全球战略布局以及重返月球计划的兴起, 星舰航天器被设计用于满足地面快速投送以及登月和火星任务需求。

### 2.1 载人月球探测任务

2021年4月, NASA宣布将利用星舰航天器作为载人月面着陆系统(Human Landing System)完成阿尔忒弥斯-3(Artemis III)载人登月任务, 按照合同要求, 星舰航天器将完成一次无人绕月飞行和一次载人登月任务。2022年11月, NASA又与SpaceX公司签署了第二份登月合同, 将在2027年利用星舰航天器实现阿尔忒弥斯-4登月任务。由此可见, 星舰航天器月球版的总体设计和飞行方案将长期直接受到阿尔忒弥斯计划方案影响。

SpaceX公司拟采用两级完全重复使用方案完成载人登月任务。根据NASA在2023年4月18日公开的月球到火星战略信息<sup>[2]</sup>, 星舰航天器月球版支持在环月轨道“猎户座”(Orion)飞船或“门户”(Gateway)空间站对接, 实现航天员穿舱并完成人员和货物的月球南极往返运输任务。在月球表面, 由星舰航天器为宇航员提供可支持不少于6 d月面驻留与活动的居住空间、消耗品等基础保障。

由于目前尚未公布星舰航天器月球版支持载人月球探测的完整系统及任务方案, 下文将根据已知的任务信息对该航天器在飞行期间和月面停留期间的能力及性能需求进行初步估算分析。



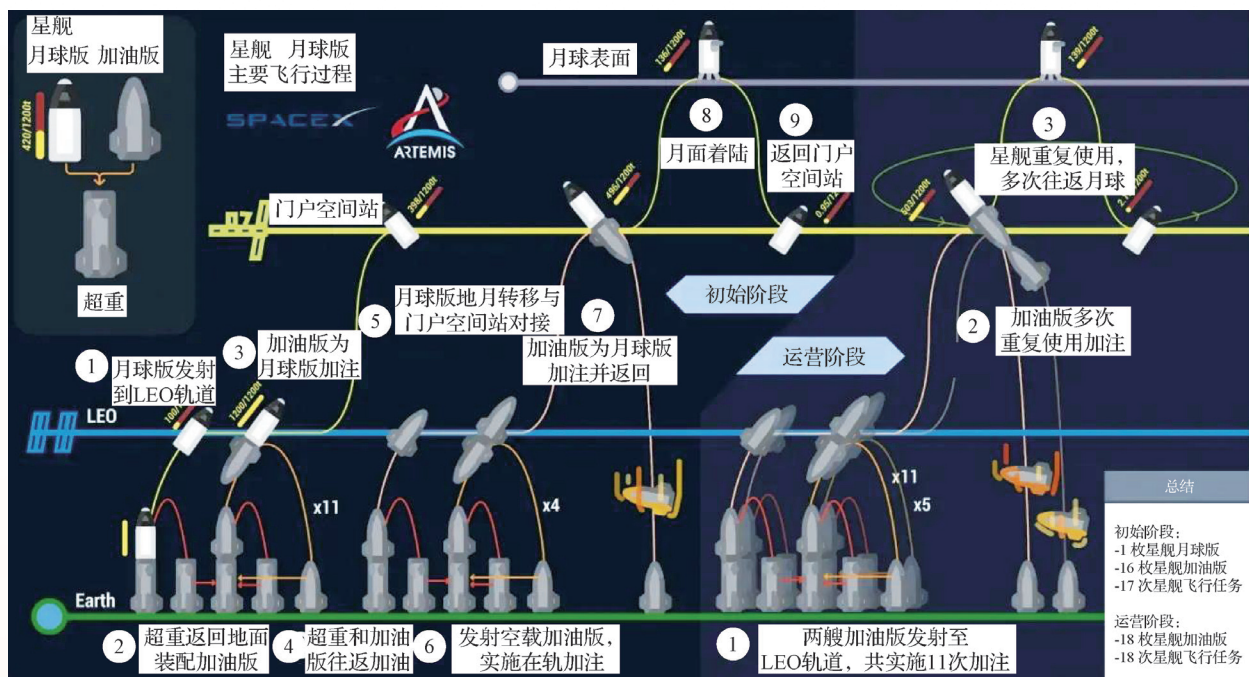


图 3 星舰载人往返月球飞行过程示意图

Fig. 3 Diagram of a manned flight to the Moon and back using the Starship

### 2.1.1 飞行期间

星舰航天器将与不同种类飞行器进行多次对接，因目标飞行器质量差异较大，对航天器自身和组合体控制都提出了较高要求。星舰航天器在飞往月球前将完成 3~4 次在轨加注，由此带来低温推进剂输运转移问题有待解决。

阿尔忒弥斯 -3 任务将在月球南极着陆，地形整体起伏较大，适宜着陆区的平均坡度约为  $10^\circ$ 。星舰航天器质量规模较大，为实现月面高精度软着陆，需解决推进剂液体晃动、着陆稳定性、发动机多机并联推力控制和动平衡等问题。

由于星舰航天器月球版采用整体落月方案，且主结构材料选用不锈钢合金，致使其最小落月总重预计达到 200 t。为保证如此质量规模的系统在垂直落月期间不发生倾倒，除优选着陆点外，还需配置不小于 10:1 的深度变比冲发动机。为支持该系统返回地球，星舰航天器需在月地转移前利用在轨加注任务补足不少于 600 t 的推进剂。

### 2.1.2 月面停留期间

考虑月球南极地区约为 40 K~200 K 低温、太

阳照射角较低、阳光辐照度约为  $0\sim 36\text{ W/m}^2$  等恶劣环境情况，星舰航天器落月后需对推进管路和贮箱进行温度保持。如此规模的航天器系统在月面工作也将消耗数千瓦级能量，为保证整器温度与能量平衡，经初步估算星舰航天器需配备不少于 2 t 的电源系统。为了提升光伏系统效率，需在航天器顶端布置太阳翼等相关设备。

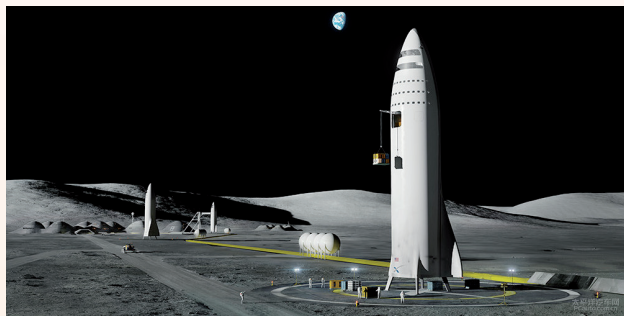


图 4 SpaceX 月球基地设想图

Fig. 4 SpaceX's Moon Base

为支持早期 4 人 7 天级月面驻留任务，且具备 5 次出舱月面活动能力，如采用非再生生保模式，星舰航天器需配置不少于吨级的生命保障系统；考虑到极端条件下的辐射防护，还需配备不少于 8 t

的防护结构或材料；为便于宇航员出舱后能够安全抵达月面并返回、载荷设备能够顺利平稳部署，需配置不低于 20 m 高度的升降电梯等转移机构。

随着阿尔忒弥斯计划的逐步实施，NASA 远期将向月面部署工程机械、原位资源利用、大功率星表能源系统和各类科学载荷设施，为避免发生碰撞，要求星舰航天器具备高精度定点着陆能力；为实现系统互动，还需设计预留与各外部系统的高速通信和大功率能源接口。

基于上述分析，考虑高效能源、轻量化生命保障、低温推进剂补加和深度变比冲发动机等技术攻关周期较长、难度较大，需合理安排在轨验证任务。

## 2.2 载人火星探测任务

虽然阿尔忒弥斯计划近期规划聚焦于月球南极，但其终极目标是载人火星探测，这与星舰航天器设计初衷不谋而和，可以利用月球任务开发和测试火星任务相关技术能力<sup>[3]</sup>。

2021 年 11 月，SpaceX 公司曾联合 NASA 向美国科学院提交了基于星舰航天器建立火星基地的白皮书<sup>[4]</sup>，首次描述了使用星舰航天器将人类送往火星并建立长期移民地的过程。

2023 年 4 月，SpaceX 公司发布了“火星任务”概念短片，展示了如何利用星舰航天器将人类从地球送往火星和利用火星原位资源利用生产推进剂支持人员火面起飞返回地球，并在视频最后设想了由巨大穹顶组成的火星基地场景。

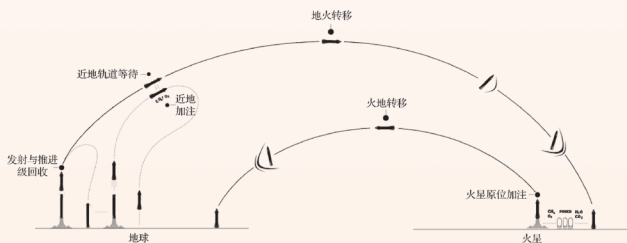


图 5 星舰载人往返火星飞行过程示意图

Fig. 5 Diagram of a manned flight to the Mars and back using the Starship

虽然火星移民计划很宏伟，但仍面临大量技术问题尚未解决。为满足人类在火星长期生存条件，

必须对火面环境加以改造，需要有足够氧浓度的大气、需要有大量可利用水资源、需要有适宜人类和动植物生长的温度环境等。由此对星舰航天器的运输能力提出了较高要求。

由于目前尚未公布星舰航天器火星版支持火星移民的完整系统及任务方案，下文将以马斯克提出的火星探测首批“百人志愿者”计划为例，对该航天器在飞行期间和火面停留期间的能力及性能需求进行初步估算分析。

### 2.2.1 飞行期间

根据轨道特性，地火转移发射窗口约每两年一次，在两个发射窗口间隔周期内，可在近地轨道完成星舰航天器在轨加注和维修任务。假定星舰航天器每次载人发射乘载 10 人，完成地火转移的平均时间约为 200 d，则需配备包括消耗品、再生系统、辐射防护等设备在内初始重量不少于 130 t 的生保系统。考虑采用霍曼转移轨道执行火星探测任务，地火转移和火星制动速着陆度增量平均约为 8 km/s，每枚星舰航天器需在近地轨道完成 2~3 次在轨加注才能实现载人落火，那么将百名志愿者送往火星需发射约 40 枚星舰航天器。



图 6 星舰火星再入气动减速示意图

Fig. 6 Schematic diagram of aerodynamic deceleration of the Starship Mars reentry



## 2.2.2 火面停留期间

由于缺少火地返回的必要条件,首批志愿者将在火星表面至少生存数年之久。为满足百人火面长期驻留的空间、能源和物资需求,需提前向火星部署大功率能源系统、基础生保物资、大规模增压舱段和工程机械等系统。

火星表面平均温度约为  $-60^{\circ}\text{C}$ ,且经常处于沙尘天气,初期驻留需依靠核能源系统提供能量保障。供百人使用的星表微型核裂变堆系统质量约为 40 t,为保证人员安全,还需配备约 240 t 规模的屏蔽系统和 10 t 规模的高压远距离输电设备,仅能源系统部署将至少需要发射约 30 枚星舰航天器。

如载人火星基地采用受控生态系统作为生活保障主要模式,则需提前向火面部署不少于 162 t 的初始物资。考虑人员活动空间和动植物培养空间需求,需提前向月面部署不少于  $16000\text{ m}^3$  规模的增压空间。即便采用柔性舱段建设火星基地,且充分复用星舰航天器各舱段,仍然至少需要发射约 160 余枚星舰航天器才能完成基础生存环境部署。

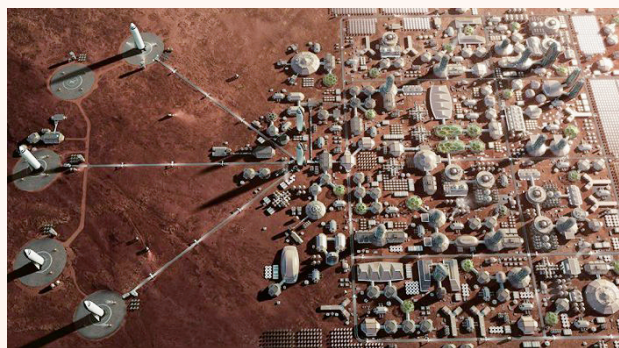


图 7 SpaceX 火星城市设想图  
Fig. 7 SpaceX's Mars City

根据本文估算,为满足火面长期驻留基本需求,完成火面基础设施建设等任务将至少实施约 300 次星舰发射。考虑物资损耗补给并开展火星基地建设、原位推进剂制取、火星环境改造等长期任务,总体发射规模将成倍增加。马斯克曾公开表示完成“百人志愿者”单程火星移民方案需发射千枚星舰航天器。

基于上述分析,若想利用星舰航天器实现载人火星探测与返回任务,需进一步攻克航天器批量生

产、大规模火面基础设施部署、长期在轨生命保障、火面原位资源利用等技术,甚至还需解决空间伦理、国际法律等相关问题。

## 3 结束语

随着航天技术的快速发展,人类对宇宙的认识逐步加深,向地外空间拓展文明的愿望也逐渐增强,迟早将离开地球迈向火星乃至更远的深空,SpaceX 公司已支持 NASA 从商业层面对载人深空探测展开工作。在此提出以下几点考虑:

### (1) 开展载人深空探测论证和体系研究

载人深空探测是复杂系统工程,技术体系极为庞大,每一个技术环节都可能成为木桶效应的短板,需要对各次任务进行合理规划,统筹远期发展,分步实施技术攻关与验证工作。

### (2) 尽早开展关键技术攻关

需对超重型运载火箭、地外高效能源系统、地外原位资源利用和受控生态系统等技术开展研究,应对影响长期计划制定的基础性研究和需长期攻关的关键技术提前布局攻关。

### (3) 开展载人月球科考与开发规划论证

月球是载人深空探测的绝佳试验场,既提供了新技术在空间环境的验证条件,又可支持火星等地外天体探测任务中转。应以载人火星探测为目标对远期月球探测任务开展深入分析论证。

### (4) 创新体制,探索新的研制模式

载人深空探测是惠及全人类的巨大工程,创新研制模式有利于刺激行业快速进步,应促进多领域、多渠道合作,共同推进人类社会向空间扩张。

## 参考文献

- [1] 焉宁,胡冬生,郝宇星. SpaceX 公司“超重-星舰”运输系统方案分析[J]. 国际太空, 2020(11): 11-17.
- [2] YAN Ning, HU Dongsheng, HAO Yuxing. Analysis of SpaceX's Superheavy - Starship transportation system [J]. Space International, 2020(11): 11-17.

- [3] KANDYCE G, NUJOU D M, SHATEL B. Exploration systems development mission directorate (ESDMD) Moon-to-Mars architecture definition document[R]. Washington, D.C., USA: National Aeronautics and Space Administration, 2023.
- [4] KORSMEYER D. Artemis program vision[R]. Washington, D.C., USA: National Aeronautics and Space Administration, 2020.
- [5] SPACE X. Accelerating martian and lunar science through SpaceX Starship missions[EB/OL]. (2021-11-18) [2023-05-05] [http://surveygizmoresponseuploads.s3.amazonaws.com/fileuploads/623127/5489366/111-381503be1c5764e533d2e1e923e21477\\_HeldmannJenniferL.pdf](http://surveygizmoresponseuploads.s3.amazonaws.com/fileuploads/623127/5489366/111-381503be1c5764e533d2e1e923e21477_HeldmannJenniferL.pdf)

## 作者简介

赵毓 (1992-), 男, 博士, 工程师, 主要从事载人月球探测体系及任务规划、月球科研试验站总体方案设计等方面的研究。

电话: (010) 68111728

E-mail: jlyzzhaoyu@163.com

王平 (1981-), 男, 博士, 研究员, 主要从事载人深空探测体系及任务规划论证、关键技术攻关等方面的研究。

电话: (010) 68111719

E-mail: dandanping917@163.com