

# 超重-星舰演变历程及未来发展方向分析

李明华

(中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076)

**摘要:** SpaceX的超重-星舰星际运输系统项目发展迅速, 目前已进入轨道级试飞阶段, 或将成为改变世界航天格局的又一利器。通过梳理超重-星舰系统设计迭代历程, 重点总结不同阶段的主要技术变化及改进动因, 分析其技术特点, 并探讨了该型运载器未来的应用方向, 可为中国航天运载器的发展提供启示。

**关键词:** 超重-星舰; 方案演变; 技术特点; 未来应用

中图分类号: V47

文献标识码: A

## Analysis on the Evolution Course and Future Development of SuperHeavy Starship

LI Minghua

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing, 100076)

**Abstract:** SpaceX's SuperHeavy Starship interstellar transportation system project is developing rapidly and has now entered the orbital-level test flight stage, which may become another powerful launch vehicle to change the world's aerospace landscape. The different stages of the design iteration of the SuperHeavy Starship system are sorted out. The main technical changes and improvement motivations in each stage are summarized. The technical characteristics and the future application direction of SuperHeavy Starship are analyzed. It is hoped to provide enlightenment for the development of China's space launch vehicles.

**Keywords:** SuperHeavy Starship; scheme evolution; technical features; future applications

### 0 引言

超重-星舰是太空探索技术公司(SpaceX)正在研制的运载能力超百吨的重复使用运载火箭, 将代替猎鹰9和猎鹰重型火箭。其技术方案经历了十余年的迭代演变, 在外形、结构、动力上进行了大量调整, 目前已完成4次全箭飞行试验, 但仍需在细节上进行优化。

超重-星舰是迄今全球体积最大、运载能力最强的火箭系统, 设备具备完全可重复能力, 能够执行卫星发射、轨道空间站补给与维护、全球点到点快速货物运输、深空探测及火星殖民计划。一旦投入使用, 必将对航天领域产生深远影响。

### 1 技术方案演变

超重-星舰的方案演变经历了4个阶段, 逐步从方

案酝酿走向工程验证和量产, 见图1。

#### 1.1 方案酝酿阶段(2005—2015年)

SpaceX几乎从成立之初就面向火星殖民的最终目标酝酿运输系统方案, 持续近10年。这一阶段SpaceX主要对关键技术进行了储备和论证, 包括发动机技术、箭体材料和热防护材料等。

##### 1.1.1 早期的大猎鹰火箭

2005年, 猎鹰1火箭首飞时, SpaceX创始人埃隆·马斯克首次提出大猎鹰火箭(Big Falcon Rocket, BFR)的概念, 称其能够将100 t的有效载荷发射到近地轨道<sup>[1]</sup>, 但当时并未明确具体方案。

SpaceX在2009年公开猛禽发动机研制计划, 但当时与超重-星舰无关, 而是计划用于猎鹰重型火箭上面级的氢氧发动机。2011年, SpaceX组建小型团队负责猛禽发动机的研发, 但优先级较低, 进展缓慢。

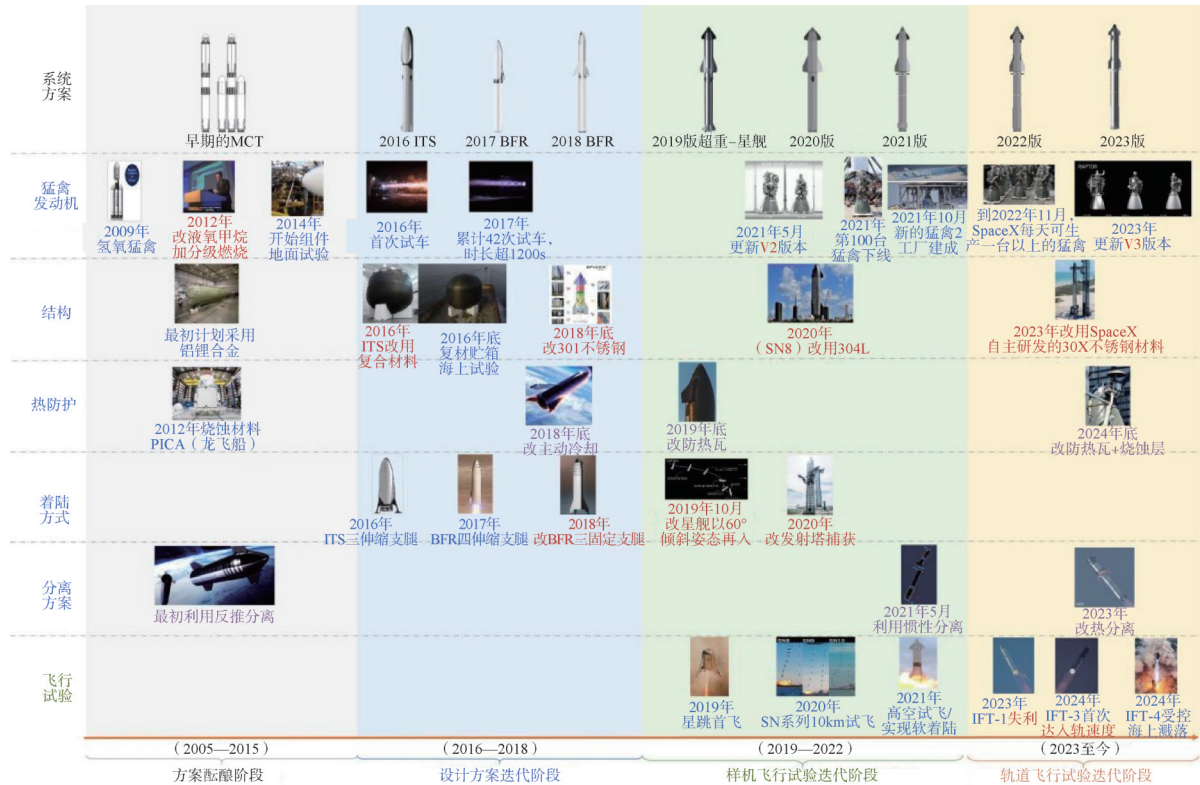


图1 超重-星舰演变历程

Fig.1 The evolution of SuperHeavy Starship

### 1.1.2 火星殖民运输机

2012年, 马斯克提出“火星殖民运输机”(Mars Colonial Transporter, MCT) 概念, 能够将100人或100 t的货物运送到火星<sup>[2]</sup>。MCT最初采用3个通用芯级并联的方案, 每个芯级配备9台猛禽发动机。但考虑到复用状态下的性能损失, SpaceX决定采用单芯级。2015年, MCT的设计更新为高180 m、直径12 m的单芯级设计。助推级(一级)采用27台猛禽发动机, 飞船级(二级)采用15台猛禽发动机, 能够重复使用, 近地轨道运载能力236 t。技术方案主要调整包括:

a) 猛禽发动机被调整为MCT主发动机, 采用液氧/甲烷推进剂, 并从燃气发生器循环改为分级燃烧循环。采用液氧/甲烷的原因包括: 1) 比冲高, 最高可达到380 s; 2) 结合深冷技术, 液态甲烷和液氧的汽化温度更接近, 便于采用共底贮箱。分级燃烧循环则是以较高的复杂度换取更好的性能。

b) 箭体结构从铝锂合金材料调整为碳纤维复合材料, 热防护采用烧蚀材料。最初MCT箭体结构计划采用铝锂合金, 可采用已经掌握的搅拌摩擦焊, 具有高强度质量比。到2015年, SpaceX决定使用复合

材料大幅降低结构质量, 热防护系统(Thermal Protection System, TPS)计划沿用龙飞船的酚醛浸渍碳烧蚀材料(Phenolic Impregnated Carbon Ablator, PICA)。

c) 设计之初即考虑采用在轨加注技术开发加油船, 满足星际运输需求。2015年, SpaceX在MCT方案中就引入了加油船, 通过发射3枚加油船到近地轨道, 对火星MCT飞船级在轨加注满推进剂。

### 1.2 设计方案迭代阶段(2016—2018年)

2016年, 星际运输系统项目进入了设计方案迭代阶段, 公司主要研制力量逐渐从猎鹰火箭转移至该项目中, 每年对设计方案进行较大调整。

#### 1.2.1 星际运输系统

2016年, SpaceX正式公布用于火星殖民的星际运输系统(Interplanetary Transportation System, ITS), 见图2, 延续MCT的主要技术特征, 进一步明确设计参数<sup>[3]</sup>。ITS直径12 m, 全长122 m, 采用两级构型, 重复使用状态下近地轨道运载能力最高达300 t。助推级高77.5 m, 配备42台猛禽发动机, 总推力128 100 kN。助推级设有4个六边形可折叠栅格舵, 用于辅助姿控。ITS飞船级高49.5 m, 配备3台海平面型

猛禽发动机和6台真空型猛禽发动机，推力为30 890 kN。飞船级带有折叠式太阳能帆板，用于在轨运行时为系统供电，并配备3个可伸缩着陆支腿。ITS沿用了MCT的加油船方案，推进剂加注量高达2 500 t。

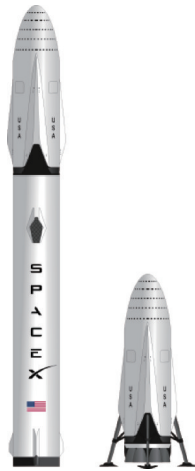


图2 2016版ITS

Fig.2 2016 version ITS

### 1.2.2 2017版大猎鹰火箭

2017版BFR是星舰迭代历程中规模最小的构型(见图3)，直径减小至9 m，全长106 m，复用状态下近地轨道运载能力150 t，能够携带50 t载荷从轨道返回地面。助推级高58 m，起飞质量3 065 t，采用31台猛禽发动机，总推力为52 700 kN。飞船级长度缩小至48 m，增压舱体积为825 m<sup>3</sup>，起飞质量为1 185 t(不含有效载荷)，配备2台海平面型猛禽发动机和4台真空型猛禽发动机<sup>[4]</sup>。本阶段碳纤维主贮箱工具已经订购，生产设施正在建设。主要技术方案调整包括：

a) 优化外形和着陆支撑机构，提升返回着陆操纵性。结构直径从12 m缩小至9 m，气动外形多处调整：栅格舵从六边形状网格结构调整为与猎鹰9栅格舵类似的长方形网格结构；飞船级尾部增加了一对三角翼，相对较小且更轻，能提供俯仰和滚转控制，以保证再入大气层时的姿态。此外，为了提高着陆稳定性，飞船级着陆支腿从3个增加到4个。

b) 发动机结构紧凑度提升，高温合金技术得到突破并应用于液氧涡轮泵。猛禽发动机更轻、更紧凑，非常注重可靠性，少数部件采用3D打印，但大部分部件是机械加工的锻件，同时SpaceX为液氧涡轮泵研发了新型高温合金。

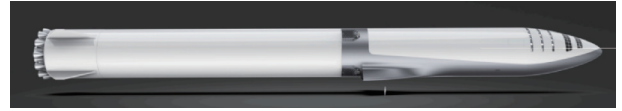


图3 2017版BFR

Fig.3 2017 version BFR

### 1.2.3 2018版大猎鹰火箭

2018年，BFR方案再度更新，直径保持9 m，全长增加至118 m，近地轨道运载能力为100 t。助推级增至63 m，仍然采用31台海平面型猛禽发动机。飞船级增加到55 m，增压舱容量扩大到1 100 m<sup>3</sup>，配备7台海平面型猛禽发动机<sup>[5]</sup>。主要改进包括：

a) 优化气动外形，采用尾翼与着陆机构一体化设计，飞船级弃用小三角尾翼方案，改用双鸭翼和三固定尾翼，尾翼同时充当着陆支撑机构。

b) 初步明确再入解决方案，飞船级腹部采用PICA防热罩。

c) 取消真空型猛禽发动机，全箭共用一型发动机。

### 1.2.4 2018版超重-星舰

2018年底，SpaceX将BFR更名为超重-星舰(SuperHeavy Starship)，并将箭体结构从复合材料变更为不锈钢<sup>[6]</sup>。选择不锈钢结构的原因包括：a) 价格低廉，工艺简单成熟；b) 不锈钢有更高的耐热温度，可大幅降低热防护质量；c) 不锈钢在室温条件下强度不及碳纤维，但在太空超低温条件下仍具备12%~18%的延展性，强度可提高50%，优于碳纤维<sup>[7]</sup>。

### 1.2.5 该阶段取得的技术进展

设计方案迭代阶段，猛禽发动机的研发工作已进入地面测试阶段，至2017年9月已经完成了42次试车，累计点火时长达1 200 s，单次最长达100 s。此外，SpaceX公司还完成了超大碳纤维复合材料推进剂贮箱原理样机研制。

### 1.3 样机飞行试验迭代阶段(2019—2022年)

2019年3月，项目进入样机飞行试验迭代阶段，对星跳号验证机、MK系列原型机、SN系列原型机和多个不锈钢贮箱进行了测试。其间，SpaceX根据试验结果持续对超重-星舰方案进行调整和优化。

#### 1.3.1 2019版超重-星舰

2019年1月，马斯克宣布将箭体结构从复合材料变为不锈钢，同时将此前设计中采用的烧蚀PICA防热罩更换为主动冷却方案。

2019年9月，SpaceX正式更新超重-星舰设计方案：直径及全长不变仍为9 m和118 m，全箭结构改

为不锈钢材料,起飞质量为5 000 t,起飞推力为72 569 kN,近地轨道运载能力150 t。助推级根据需要可配备24~37台猛禽发动机。飞船级配备6台猛禽发动机(3台海平面型,3台真空型)<sup>[8]</sup>。主要技术方案调整包括:

a) 调整星舰飞船级再入返回方案,综合采用升力式飞回和垂直起降两种路径。星舰以60°大倾角及马赫数为25的速度再入大气层,利用4个襟翼的气动力,落地前启动发动机进行翻转机动,调整为垂直姿态,减速着陆。

b) 为适应着陆机动方案,调整飞船级气动外形,采用双鸭翼和双尾翼,设置6个可伸缩着陆支腿。鸭翼和尾翼均改成梯形,以提高着陆时的翼面控制效率。

c) 再度变更再入热防护系统,放弃主动冷却方案,迎风面改为可重复使用的陶瓷基隔热瓦。

d) 姿态控制系统(Reaction Control System, RCS)由氮气冷气推力器改为挤压式液氧/甲烷热气推力器。

### 1.3.2 2020版超重-星舰

2020年3月,SpaceX发布《星舰用户指南1.0版》<sup>[9]</sup>,全长增至120 m,超重助推级增加至70 m,星舰飞船级为50 m,起飞质量为5 000 t,但并未明确发动机数量。在2020年8月,随着猛禽发动机在试车中创下燃烧室压力33 MPa的新纪录,马斯克称超重助推级发动机数量降至28台,中心的8台可摆动,外围的20台完全固定。不锈钢结构材料迭代更新,由301不锈钢改为304L不锈钢,用以提升低温条件下的延展性。

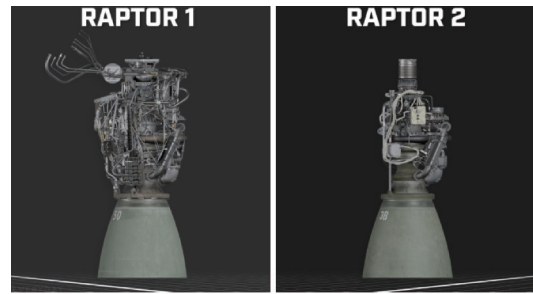
### 1.3.3 2021版超重-星舰

2021年5月,超重-星舰方案再次更新,重点在于猛禽发动机的更新换代和着陆方式的变革,并明确了发动机的数量。超重助推级发动机数量由28台增至29台,包括中心9台摆动喷管发动机和外围20台固定喷管发动机。星舰飞船级共采用6台发动机,包括中心3台摆动喷管发动机,外围配置3台真空型固定喷管发动机。主要技术方案调整包括:

a) 猛禽发动机升级换代,结构极大简化,见图4。第二代猛禽(猛禽V2)管路数量大幅减少,大量法兰连接结构改为焊接,预燃室控制器集成至模块化单元内,成本降至第一代猛禽(猛禽V1)的一半<sup>[10]</sup>。

b) 取消分离反推系统,改为基于角动量守恒的惯性分离。一是减少分离系统硬件数量,实现结构减重;二是超重助推级分离前即开始姿态翻转,为返回

点火启动做好准备。



a) 第一代猛禽 b) 第二代猛禽

图4 猛禽对比

Fig.4 A comparison of Raptor

c) 着陆支撑机构从箭上转移至地面,超重助推级上不再设置着陆支撑机构,而是利用发射塔架上的机械臂(也被称为“筷子”)捕获,可大幅降低回收操作的周转时间<sup>[11]</sup>。后续,星舰飞船级也采用类似方案。

### 1.3.4 2022版超重-星舰

2022年2月,在接受采访时马斯克公布新版超重-星舰,其全长降至119 m,重复使用状态下近地轨道运载能力100~150 t。超重助推级缩短1 m,采用33台海平面型猛禽发动机,推力约74 530 kN。星舰飞船级采用6台猛禽发动机(3台为真空型,3台为海平面型),未来可能增加至9台。同时,提出将发射/回收塔架作为整个超重-星舰系统的“第0级”,不断优化塔架捕获回收方案<sup>[12]</sup>。

### 1.3.5 该阶段取得的技术进展

样机飞行试验迭代阶段,SpaceX利用大尺寸贮箱验证了新型304L不锈钢材料的性能,猛禽发动机在试车中主燃烧室压力达到330 bar。利用原型机的150 m和10 km飞行试验验证了飞行器整体空气动力学再入能力、着陆前飞行姿态控制调整、机身襟翼控制、推进剂供应贮箱转换等。在此过程中不断优化和改进设计,包括提高发动机的技术成熟度、提高不锈钢结构加工后的密封性等。

## 1.4 全箭轨道级飞行试验迭代阶段(2023年至今)

2023年4月至今,SpaceX已完成4次综合飞行测试,验证了入轨能力和两级海上精准软着陆能力,并通过全箭系统飞行试验迭代、优化和调整设计细节。同时,加强基础设施建设,在星舰基地打造新工厂,初步产能目标为每周3枚星舰飞船级。此外,为适应未来高密度发射,正在美国东海岸LC-39A工位建设新的超重-星舰发射/回收设施,未来可能还会在东海

岸SLC-37/50发射。

#### 1.4.1 2023版超重-星舰

在综合飞行测试前,SpaceX确定了超重-星舰的基本构型。采用两级构型方案,火箭全长约120 m,箭体直径9 m,起飞质量5 000 t,重复使用状态下的近地轨道运载能力为100~150 t,一次性使用状态下的近地轨道运载能力达250 t。超重助推级安装33台海平面型猛禽发动机(13台摆动喷管发动机和20台固定喷管发动机),星舰飞船级安装6台猛禽发动机,包括3台海平面型(摆动喷管)和3台真空型(固定喷管)。全箭采用不锈钢结构,飞船级设有4个襟翼,包括一对鸭翼和一对尾部气动舵面。

在综合飞行测试后,SpaceX根据试验结果对超重-星舰进行了升级改进,主要包括:

a) 级间分离更改为热分离,助推级顶部安装了热分离部段,也称为通风式级间段,运载能力提高约10%。

b) 热防护在原陶瓷基隔热瓦的基底增加了烧蚀层结构。

c) 伺服机构由液压驱动改为电驱动,提高系统可靠性和执行机构效率。

#### 1.4.2 远期规划

2024年4月,马斯克公布超重-星舰远期规划。目前开展轨道级飞行试验的构型为第一代超重-星舰(超重-星舰V1),第二代超重-星舰(超重-星舰V2)具备完全重复使用能力,箭体长度较第一代超重-星舰增加约3 m,重复使用状态下近地轨道运载能力超过100 t。通过升级改进后,第三代超重-星舰(超重-星舰V3)箭体长度将再增加20~30 m,推力增加至98 067 kN,完全重复使用状态下运载能力可达200 t,一次性使用时可达400 t<sup>[13]</sup>。

#### 1.4.3 该阶段取得的技术进展

全箭轨道级飞行试验迭代阶段,SpaceX确定使用新型30X不锈钢材料,猛禽V3发动机在试车中主燃烧室压力达到350 bar。利用全尺寸的超重-星舰试飞箭实现了轨道级试飞,对超重-星舰的性能、地面发射支持能力及在轨推进剂加注等关键技术进行了全面的验证,试飞中达到了入轨速度并实现两级海上精准软着陆。

## 2 技术特点分析

### 2.1 高性能发动机多机并联,有助于快速实现垂直起降

超重-星舰采用的猛禽发动机以液氧/甲烷为燃料,

是全球首型实用型全流量分级燃烧循环发动机。与部分分级燃烧火箭发动机相比,工作温度较低,耐久性更好,可多次重复使用,且燃烧更充分,推力显著提升。第二代猛禽发动机燃烧室压力为30 MPa,比冲为334 s,发动机质量为1.6 t,海平面推力达2 256 kN;第三代猛禽发动机推力已提升至2 638 kN,设计具备20%~100%的节流控制能力。在发动机布局上超重-星舰继承了猎鹰火箭多发动机并联的设计思路,并通过大直径箭体实现两级串联构型,确保了构型的简洁。超重助推级采用33台发动机并联的方式可实现更大的起飞推力规模,星舰飞船级则采用6台发动机(后续可能增至9台)并联方案。对于垂直起降运载器,采用多台发动机并联设计有利于定点软着陆控制,在单台发动机推力调节范围有限的情况下,仅启动部分发动机,相当于实现更大的推力调节范围,适应推进剂消耗、子级质量大幅降低后,反推更小推力需求的着陆。另外,超重-星舰的多发动机并联方案具备故障重构能力,允许一定数量的发动机发生故障,以应对整机可靠性随并联数量快速下降的问题。

### 2.2 采用低成本不锈钢和陶瓷基隔热瓦材料实现结构强度和温度耐受

超重-星舰的结构材料均采用由SpaceX定制的30X不锈钢。低温状态下,不锈钢的可用强度要比碳纤维等材料表现得更好,同时,耐热温度优于纤维材料。30X不锈钢制造加工容易,成本约3美元/kg,而其质量较大的问题可通过动力系统提供的强大推力克服。为解决再入大气层面临的严重气动加热问题,在星舰飞船级气动加热严重的迎风面加装了整体增韧抗氧化复合结构陶瓷基隔热瓦,便于快速更换,其背风侧因不锈钢可承受普通气动加热而无需隔热层。通过对飞行测试数据的分析,SpaceX还决定在陶瓷基隔热瓦的基底增加烧蚀层结构,提高热防护性能。

### 2.3 箭地一体化设计,将部分功能转移至地面,为结构减重

SpaceX的地面配套及发射支持设备的建设思路相对激进,支撑了其高密度高功率的发射任务,其地面系统一直朝着低成本、简洁化、批量化和集成化的方向发展。在超重-星舰项目中更是提出了箭地一体化设计方案,将超重-星舰的地面支持系统称之为“第0级”,旨在把尽可能多的配套系统和复杂系统留在地面,以降低发射成本,减轻飞行质量。超重-星舰的发射台兼具回收接驳、起重吊装的功能。在回收时,勤务塔和脐带臂将像“筷子”一样夹住回收的子

级,代替箭体上的着陆支撑机构。超重-星舰系统的箭地接口也体现了这一点,SpaceX依托发射台的支撑臂增加了发动机地面供气接口,通过引入外部的三路供气,实现对火箭外圈20台发动机的点火,有利于箭上简化设计与结构减重。

#### 2.4 融合垂直起降与升力式方案技术优势,进一步优化总体性能

超重-星舰系统为完全可重复使用运载器,其火箭级与飞船级均可回收。两级通过不同回收技术进行回收,设计难度更高,对系统的研制提出了新挑战。其中,超重助推级采用垂直起降技术进行回收,而星舰飞船级设计采用升力式与垂直起降相结合的复用方式。该方式是大幅降低运载火箭发射成本、实现航班化运输的关键,是革命性提升航天运输系统能力的重要途径。

超重助推级的回收方案在经过大量设计改进后,确定采用垂直起降方案返回,并利用发射架上的称为“筷子”的机构捕获超重助推级。即超重在垂直返回接近地面时,由发射塔机械臂接住,利用超重的栅格舵来承受载荷,不再设置着陆支架。这样可以省下着陆支架的质量和成本,而且让火箭能够立即在发射台上重新就位,在不到1h后再次升空飞行。

星舰飞船级从轨道返回时以60°大倾角及马赫数为25的速度“躺着”进入大气层,利用2个鼻锥上的鸭翼和2个尾部气动舵,将尽可能最大限度地利用空气制动,精确引导下降。最终,在接近地面时将进行一次大幅机动,借助反作用控制系统和猛禽发动机进行姿态翻转,从水平状态调整到垂直状态,利用垂直起降技术实现垂直降落,由发射塔机械臂捕获和回收。

### 3 未来应用前景分析

随着轨道级飞行试验的快速突破,预计超重-星舰将在1~2年内具备百吨级运载能力,且完全重复使用。同时,在持续迭代优化的进程中,其运载能力、批产规模、入轨发射频次将远超现有航天运输系统,为各类潜在的应用场景带来颠覆性的变化。

#### 3.1 突破太阳系内大规模运输约束,拓展人类探索太空的前沿

超重-星舰具备100~200 t的运载能力,未来年产量计划达1 000发,结合多工位快速周转发射和推进剂在轨加注技术,能够支撑人类从地球出发,在太阳系内实现百吨级物资的大规模转移,构建外星基地,提升前沿探索水平。2020年至今,SpaceX已从NASA

获得超过40亿美元合同,在超重-星舰基础上研制月球着陆器,实现载人重返月球,支持美国阿尔忒弥斯深空探测计划实施。SpaceX公司正在制定火星殖民计划,希望抓住每26个月1次的地火会合期,将100万人送往火星,使人类成为“多行星物种”。

#### 3.2 增加单次和短期累积发射质量,提升利用空间的能力和水平

超重-星舰百吨级的运载能力以及超一千立方米的载荷包络空间,单次即可发射部署尺寸和质量远超现有水平的载荷,将太空装备设施的规模及能力提升到新水平。NASA已研究利用超重-星舰发射超大直径太空望远镜的方案,而美国星际实验室公司已预定超重-星舰发射其单舱段的大型空间站。在单次发射能力大幅提升的同时,快速重复使用的超重-星舰还能有效满足短期内更大规模载荷持续部署的需求,特别是预期数量数万颗的星链(Starlink)低轨星座,现役火箭几乎无法实现快速部署,SpaceX只能寄希望于超重-星舰。

#### 3.3 支持全球点到点物资极速运输,开拓军事和商业运输新路径

超重-星舰极高的载荷能力以及可返回复用的特点,允许其携带载荷经过亚轨道或轨道,降落到地球指定地点完成运输任务,以极高速度实现全球一小时抵达,而且具备运载能力强、投送距离远、不受空域限制等优势,具有广阔的军事应用前景,同时也可能成为高速商业航空运输的一种补充方式。2021年,美空军启动“火箭货运”项目,方案征集将一直持续到2027年,并在2022年1月授予SpaceX总额约1亿美元的5年期合同,验证利用超重-星舰开展全球点对点货运的技术能力。一旦实现工程应用,很可能对作战后勤补给产生颠覆性影响,提高美军事行动效能。另外,SpaceX在2017年发布概念视频,提出超重-星舰可在40 min内把乘客从纽约送到上海,展示出未来商业应用潜力。

### 4 超重-星舰发展带来的启示

#### 4.1 瞄准大规模常态化进出空间,发展重复使用重型运载火箭

美国以月球/火星长期驻留、巨型低轨星座、大规模空间基础设施建设为目标,快速推动超重-星舰的研制。未来,若超重-星舰取得成功,势必凭借其完全重复使用能力和百吨级超高运载能力,颠覆航天运输模式,重塑世界航天格局,对全球政治、经济、

军事和科技领域都将带来深远影响。面对预期可见的挑战和机遇，中国应以大规模常态化进出空间为目标，加快研制重复使用重型运载火箭，支撑国家在太空前沿的探索、研究和开发利用活动，打造航天强国的标志性工程。

#### 4.2 构建快速迭代研制模式，逐步完善复杂系统的工程解决方案

超重-星舰经历了数十个构型迭代和上百次试验异常，研制进度不断加速，关键在于借鉴软件敏捷开发流程的快速迭代研制模式。一是强调优先建立可行解，即“最小可行产品”，而非试图预测所有系统组件性能去直接寻求最优解。二是通过大量硬件试验充分暴露问题，释放系统潜在风险，实现系统级优化。三是不过度追求技术先进性，以成本作为重要约束条件，包括采用低成本易加工不锈钢和商业货架产品等，使快速迭代具有成本可行性。虽然重型运载火箭系统复杂度大幅增加，但中国航天数十年的积累以及材料工艺等基础能力的提升，势必能提供“拿来即用”的解决方案，或可借鉴超重-星舰的快速迭代模式，从中选择可行解再逐步优化，为航天系统工程带来新活力。

#### 4.3 重视制造发射基础能力建设，全面推进系统级发射能力的提升

未来，超重-星舰系统的发射能力不仅取决于产品本身的运载能力，还受制于批产能力、发射条件等，因此SpaceX不仅关注产品研制，还十分重视制造系统、发射回收设施的建设和优化。首先，在星基地集中布局一体化制造、试验和发射回收设施，优化周转效率，可将大尺寸箭体转运周期压缩到数小时内，实现设计—制造—测试的高度集成。其次，基于拉动式生产模式在新工厂内打造类传送带流水线，优化工位布局和工艺流程匹配，解决瓶颈，实现固定的生产节拍。最后，箭地一体化设计，将着陆支撑机构转到地面发射设施，降低结构质量、提高周转速度，并在星基地和肯尼迪航天中心建设多个发射/回收塔架。面向未来，需要以系统思维全面综合考虑火箭产品及其配套能力建设，保证航班化运输系统的构建。

## 5 结束语

超重-星舰项目从方案酝酿到轨道飞行试验，一直持续迭代演进，近期成功入轨并返回溅落海面的突破，表明其正在向实用型装备转化，未来或将产生颠覆性影响。通过梳理超重-星舰技术方案的演变，总结背后主要技术动因，阐明了方案迭代优化历程。结

合对超重-星舰未来探索空间、利用空间和极速运输等方面的应用前景的分析，归纳了该项目带来的启示，中国需要从系统层面上推动大规模常态化进出空间能力的发展，优化研制模式、强化配套能力，为航天强国建设提供重要的基础保障。

#### 参 考 文 献

- [1] FOUST J. Big plans for SpaceX[EB/OL]. (2005-11-14) [2024-05-10]. <https://www.thespacereview.com/article/497/1>.
- [2] ZACH Rosenberg. SpaceX aims big with massive new rocket[EB/OL]. (2012-10-16)[2024-06-10]. <https://www.flightglobal.com/space/spacex-aims-big-with-massive-new-rocket/107434.article>.
- [3] Spaceflight101. Interplanetary transport system-spaceship & tanker [EB/OL]. (2016-12-15)[2024-06-11]. <https://spaceflight101.com/spx/its-spaceship/>.
- [4] ELON Musk. Making life multiplanetary[EB/OL]. (2017-10-16) [2024-06-13]. [https://www.spacex.com/media/making\\_life\\_multiplanetary-2017.pdf](https://www.spacex.com/media/making_life_multiplanetary-2017.pdf).
- [5] DEVIN C. 18 new details about Elon Musk's redesigned, moon-bound BFR[EB/OL]. (2018-9-19) [2024-06-13]. <https://techcrunch.com/2018/09/19/18-new-details-about-elon-musks-redesigned-moon-bound-big-fing-rocket/>.
- [6] STEPHEN S. SpaceX 2018 BFR design VS 2017 BFR design[EB/OL]. (2019-02-18) [2024-06-21]. <https://www.earthtospace-science.com/post/spacex-2018-bfr-design-vs-2017-bfr-design>.
- [7] ELI Shayotovich. Why SpaceX's Starship is made out of stainless steel[EB/OL]. (2022-09-23)[2024-06-25]. <https://www.slashgear.com/1022924/why-spacexs-starship-is-made-out-of-stainless-steel-according-to-elon-musk/>.
- [8] TARIQ M. Elon Musk unveils SpaceX's new Starship plans for private trips to the moon, Mars and beyond[EB/OL]. (2019-09-19) [2024-06-25]. <https://www.space.com/elon-musk-unveils-spacex-starship-2019-update.html>.
- [9] Starship Users Guide[EB/OL]. (2020-03-30) [2024-06-15]. [https://www.spacex.com/media/starship\\_users\\_guide\\_v1.pdf](https://www.spacex.com/media/starship_users_guide_v1.pdf).
- [10] TREVOR S. Raptor 1 VS Raptor 2: what did SpaceX change?[EB/OL]. (2022-07-14) [2024-06-20]. <https://everydayastronaut.com/spacex-raptor-engine-comparison/>.
- [11] AUSTIN DeSisto. Elon Musk's Starship update-February 2022[EB/OL]. (2022-02-11)[2024-05-25]. <https://everydayastronaut.com/elon-musks-starship-update-february-2022/>.
- [12] ROBERT Z P. Elon Musk shows off fully-stacked SpaceX Starship as 1st orbital launch nears[EB/OL]. (2022-02-11)[2024-05-25]. <https://www.space.com/elon-musk-starship-update-starbase-2022>.
- [13] EVELYN J A. SpaceX's third version of the Raptor engine reaches a new thrust record-Starship is destined to be the world's most powerful rocket in history! [EB/OL]. (2023-05-13) [2024-06-20]. <https://www.tesmanian.com/blogs/tesmanian-blog/raptor-v3>.

#### 作 者 简 介

李明华 (1962—)，男，研究员，主要研究方向为航天飞行器设计与控制、工程管理。