

美国超重-星舰首飞分析及对中国航天产业发展启示与建议

SpaceX heavy-lift Starship: Implications and recommendations for the development of China's aerospace industry

孟光^{1,2}, 刘昶³, 杨冬春³, 周城宏⁴, 周华³

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海航天技术研究院, 上海 201109;

3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 4. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100190)

摘要: 重复使用运载器研制是航天发展的不懈追求, 美国太空探索技术公司两级完全重复使用运载器“超重-星舰”实现首次发射, 发射阶段圆满, 后续飞行失控后执行自毁程序。本文介绍了超重-星舰的首飞情况与方案演进, 根据超重-星舰总体方案反演分析其应用模式, 梳理了超重-星舰的核心关键技术, 总结了超重-星舰对航天产业的影响, 最后给出了超重-星舰对中国航天发展的启示与建议。

关键词: 超重-星舰; 中国航天; SpaceX

Abstract: The development of reusable launch vehicles has been a relentless pursuit in the field of aerospace engineering. The maiden launch of the fully reusable two-stage heavy-lift Starship by the U.S. company SpaceX was successfully completed in its initial stages, but the subsequent flight experienced a loss of control and ultimately self-destructed. This article presents an overview of the heavy-lift Starship's maiden flight and its evolutionary design, analyzes its application modes based on the overall scheme, identifies the core critical technologies involved, and summarizes the impact of the heavy-lift Starship on the aerospace industry. Finally, it provides insights and recommendations for the development of China's aerospace industry in light of the heavy-lift Starship's achievements.

Keywords: heavy-lift Starship; China's aerospace; SpaceX

1 首飞概述

北京时间 2023 年 4 月 20 日 21 时 38 分, 美国太空探索技术公司的超重-星舰成功实现首次发射, 发射阶段圆满, 但遗憾的是起飞后多台发动机陆续出现故障, 在飞行至 36km 高度时, 由于一级推进剂耗尽, 全箭姿态失稳, 一二级分离失败, 最终执行了箭上自毁程序。尽管发射失败, 但却是一次非常伟大的尝试。

首飞目的重点考核超重-星舰的工程可行性, 验证发动机、结构、控制和增压输送等主要系统在复杂飞行环境中的可靠性, 此次飞行通过了全箭上升段最大动压点, 其一级飞行段的结构、

控制、增压输送系统的正确性和可靠性得到初步验证。



图1 “星舰”轨道飞行试验示意图^[1]

2 超重-星舰方案演进

超重-星舰 (SuperHeavy-Starship) 是太空探索公司 (SpaceX) 在 2016 年提出为“殖民火星”、“使人类成为多星球物种”等伟大远景研制的重型太空运输系统，具备完全重复使用和超大的运载能力，可执行近地轨道、月球、火星甚至更远轨道的商业航天发射任务。

经过7年十轮以上方案迭代，超重-星舰系统高约120m，起飞总重约5200t，起飞推力约7600t。一次性状态近地轨道运载能力250吨，两级重复使用状态近地轨道运载能力150吨，下行返回载荷能力50吨。基础级“超重”火箭高约70m，直径9m，推进剂加注量为3400t，安装33台“猛禽”液氧甲烷发动机；“星舰”高50m，直径9m，设6台猛禽液氧甲烷发动机，3台海平面型和3台真空型^[2]。

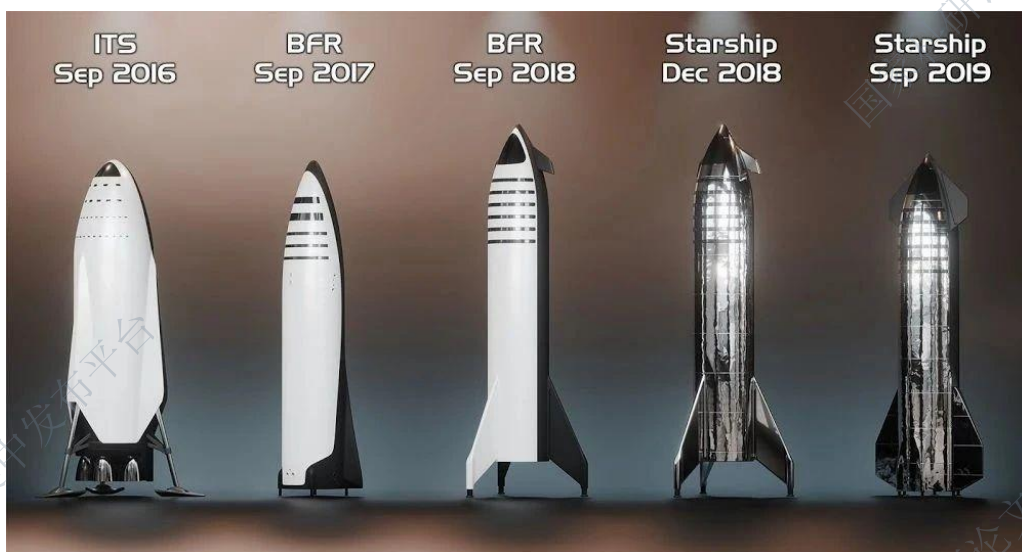


图2 “星舰”的演变过程^[3]

超重-星舰系统采用独特的返回飞行模式：超重返回类猎鹰9模式，返回发射台机械臂捕获回收；星舰返回采用航天飞机+类似一子级垂直着陆返回相结合模式，返回发射台机械臂捕获回收^[4]。

3 超重-星舰的应用模式分析

星舰的功能与任务覆盖了目前近地、高轨、深空、载人等近乎全部的航天运输任务，应用范围主要由1h全球抵达运输、天地往返运输和空间转移运输等三类系统组成，具有重复使用、智能化等技术特征。

3.1 洲际战略投送分析

2021年5月美国空军公布在2022财年的科学与技术战略中将提供4790万美元给SpaceX星舰项目，用以实现一小时内全球点对点100t有效载荷战略投送的预先研究工作^[5]。

美国空军全球一小时投送的概念来源于SpaceX公司对于星舰的主要功能定位之一：地球上城市间的点对点航班洲际运输的设想。在其设想中，地球上最远距离的两个城市，在空中飞行的时间不会超过一个小时。



图3 星舰全球一小时洲际运输概念示意图^[6]

对“星船”一小时全球投送进行反演计算，星舰具备60min内从美国本土起飞，将百吨战略物资投送至亚太的能力，但一小时内实现投送至全球的任意角落（航程20000km），最大飞行速度、最大过载等参数将大大超出现有飞行包络约束。

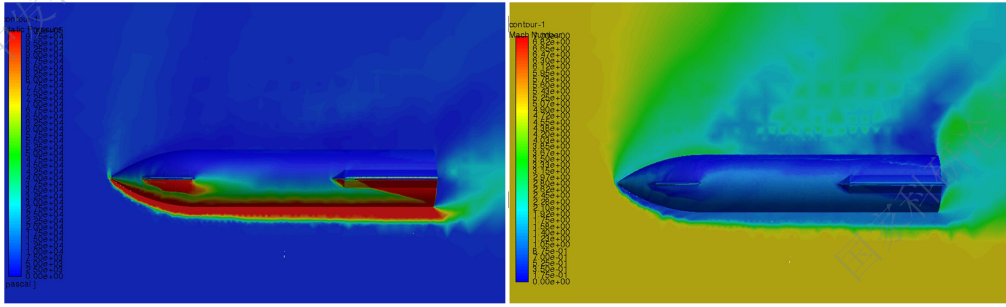


图 4 星船主动段在 $Ma=5.0$, $\alpha=60^\circ$ 时流场压力和马赫数分布云图

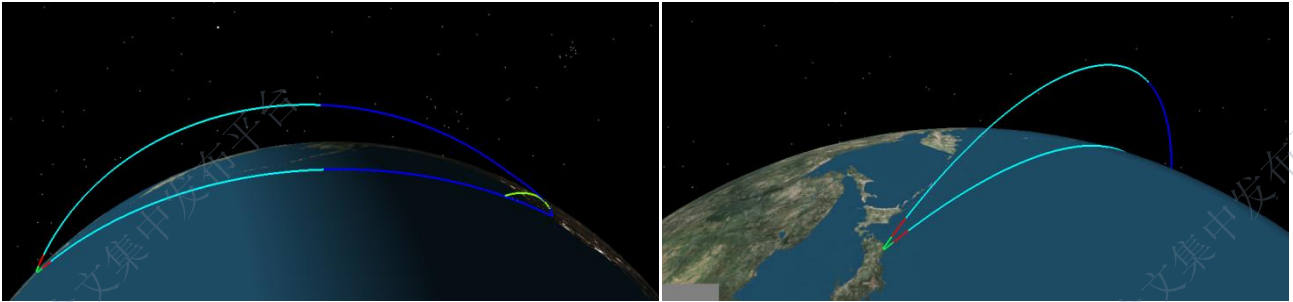


图 5 旧金山-东京的弹道仿真

虽然火箭运输在飞行速度上优势明显，但考虑火箭推进剂的物理特性、加注需求和加注时间，货物装载方便性等因素，与成熟的航空运输相比，目前火箭作为常规运输工具的整体效率和效益偏低。综合分析，星舰作为洲际战略投送，仅适用于非战场条件下的应急战略补充。

3.2 轨道运输分析

星舰本质上是航天飞机和猎鹰 9 火箭技术迭代更新的新一代产品，在民用和军用方向均有较高的应用价值。

➤ 民用方面

星座组网发射：星舰可以一次性发射 400 颗星链卫星，相比于猎鹰 9 一次 60 颗的发射能力，将极大提升星链项目组建效率；



图 6 星链发射示意图^[7,8]

超大型卫星发射：星舰超大的整流罩容积和运载能力，为研制和发射超大型卫星提供了可能，这类超大型综合卫星，是未来在轨加注、轨道服务、轨道清理及其他综合技术的基础，有较大的发展前途；

空间站建设和补给：星舰的整流罩容积、直径和运载能力，极为适合发射大型的空间站舱段，由于其上行和下行能力较强，可为空间站进行低成本的高效补给，为空间站的科研设备和生活提供更有力的支撑；



图 7 空间站建设和补给示意图^[9]

回收/维修卫星：星舰可以从轨道带载荷回地球，类似航天飞机曾经抓捕卫星回地球修理后再发射，或直接在轨道上对卫星进行维修或加注，对于一些高价值卫星有不小的吸引力，未来卫星的应用模式也可能会随之发生变化。

➤ 军用方面

发射大型军事卫星：星舰的超大运载能力和整流罩空间，可以发射大型的军事卫星，将目前的侦察、预警等分散功能卫星集中起来，更有效提升反应和作战效能，对于提升改善全球导弹防御系统有较好的效果；

发射大型武器平台：空间攻防武器的能力，极大依赖于载荷平台的在轨、变轨机动能力和武器载荷的大小，对平台本身的大小和重量要求较高，星舰可提供极佳的运载能力和包络空间条件；



图 8 发射大型卫星或大型空间武器平台^[10]

空间操作载荷平台本身：星舰超大的体积容量和返回地球能力，存在抓捕对方卫星或空间武器回地球的可能；

空间战略武器平台：利用星舰的能力和空间，携带近百吨的各类武器，再利用星舰的在轨和变轨能力，可实现全球化全天候快速打击，在战略值班时期，星舰可以交替返回地球，相比于传统三位一体的核打击模式增加了一个新的选择。

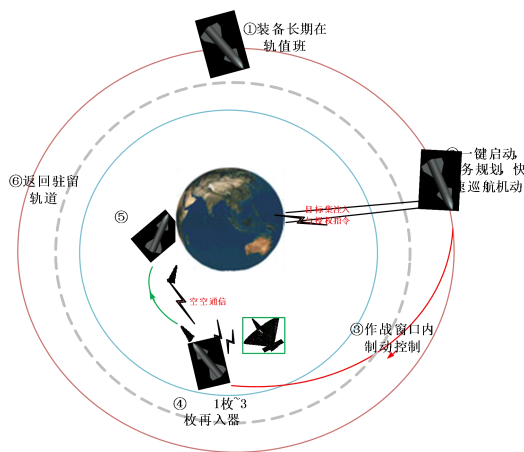


图 9 星舰作为战略武器平台示意图

3.3 载人登月分析

目前 SpaceX 以星舰为基础的登月球先后拿下了 NASA 的 CLPS 供应商资格和 HLS 飞行测试与演示验证任务。数艘星舰在实现载人着陆任务时具有不同的目的，但每艘星舰都基于通用的星舰设计。符合 NASA 载人评级的星舰将首先发射到低地球轨道，与用于推进剂储存的星船对接并接受推进剂加注，随后继续飞往月球轨道。



图 10 星舰在月表起降示意图^[9]

目前而言，星舰作为登月着陆器效率并不高，根据星舰目前的参数以及登月所需速度增量反算，星舰构型要实现载人登月（两辆月球车，乘坐 8 人，重量按 11.6t 计算），星舰在轨总加注量为 1754t，需要 14 次发射补给才能实现星舰的月面着陆。未来深空探测，二子级需要对不锈钢材料进行更换。

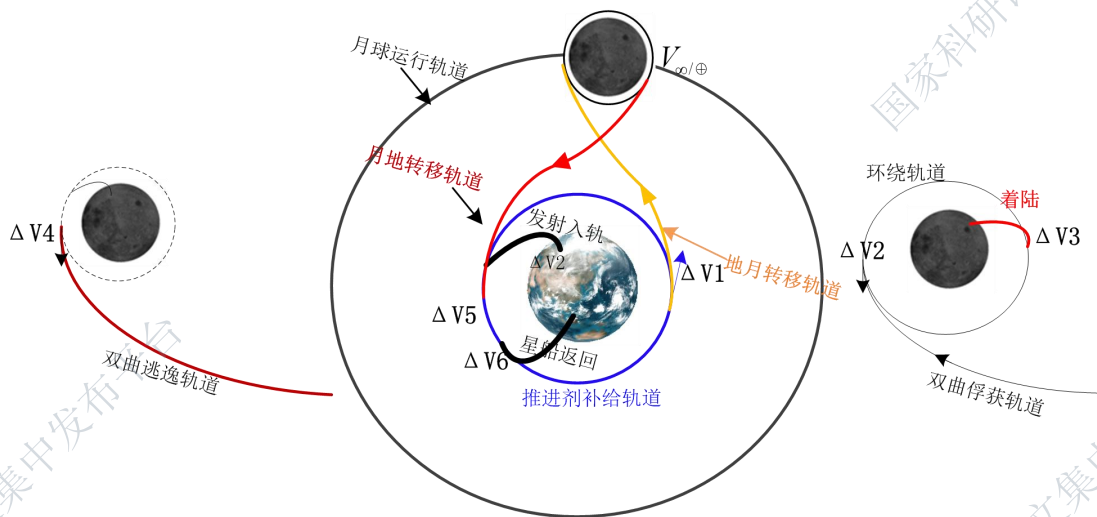


图 11 登月示意图

表 1 载人登月不同轨道速度增量分析

项目	速度增量(m/s)	备注
ΔV_1	3107	补给轨道变轨至地月转移轨道
ΔV_2	819	地月转移轨道变轨至月球环绕轨道
ΔV_3	21	星船由环月轨道离轨下降到月球
ΔV_4	819	月球环绕轨道变轨至月地转移轨道
ΔV_5	3107	月地转移轨道变轨至补给轨道
ΔV_6	600	星船由补给轨道离轨

4 超重-星舰的技术特点分析

超重-星舰的成功应用，将突破运载火箭固有的设计理念，在整箭工程、多发动机并联、高性能发动机、超大箭体的 GNC、返回热防护、复杂剖面推进剂管理、原位发射与回收等方向取得历史性突破。

4.1 整箭工程技术

运载火箭发展历经三个时期，第一个时期以任务需求为牵引，有什么任务研制什么火箭；第二个时期以能力为驱动，根据已有任务研制能力梯度覆盖的运载火箭；第三个时期：以市场需求和重复使用为目标发展运载火箭（猎鹰 9）。超重-星舰研制不属于以上三种模式，其以载人登火梦想构型为指引，通过持续迭代发展两级重复使用运载火箭，没有任务牵引，没有能力驱动，没有市场需求。

4.2 全流量补燃循环液氧甲烷发动机技术

超重和星舰采用的“猛禽”液氧甲烷发动机，为世界上第一型工程应用的闭式全流量分级燃烧循环发动机。该燃烧循环方式包含两个预燃室，富燃预燃室驱动燃料泵，富氧预燃室驱动氧泵，氧化剂和燃料以气态进入燃烧室，使得燃烧更加充分，闭式全流量分级燃烧具备以下特点：

- (1) 高性能。把所有推进剂均转化为燃气用于涡轮做功；推力室气气燃烧效率高；
- (2) 推力室燃烧稳定性好。气气燃烧稳定；
- (3) 密封相容性好。富氧、富燃两套单独的发生器涡轮泵系统，涡轮和泵之间相容性好，无需不同推进剂泵之间的组合式密封；
- (4) 系统复杂。组件多，系统匹配、调节、起动控制难度大；
- (5) 总体布局复杂。组件多、流路复杂、双燃气路；
- (6) 推力室冷却难度大。气气喷注器冷却。

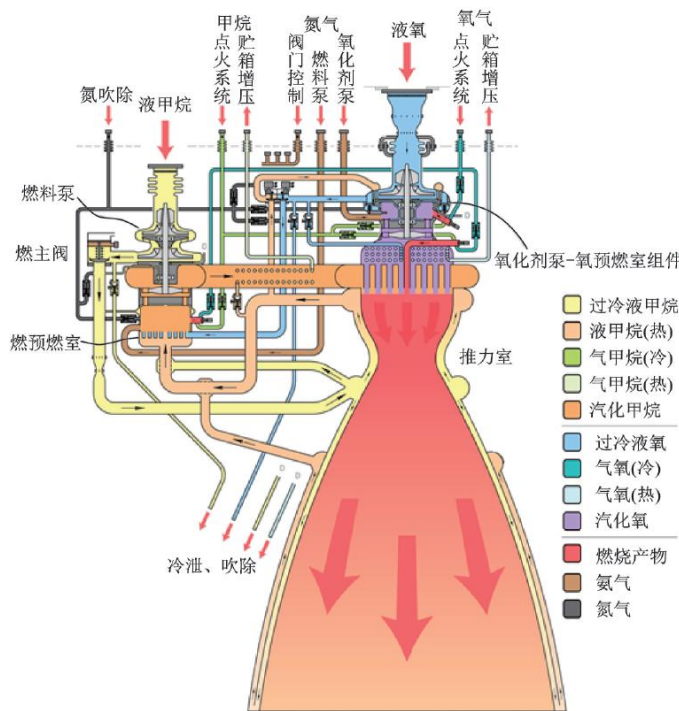


图 12 猛禽发动机示意图^[11]

“猛禽”发动机一直在进行技术改进，燃烧室室压从 25Mpa 提升到了 30Mpa；推力由 185t 提升到 230t；发动机质量由 2t 降低为 1.6t。9m 直径放了 33 台发动机，实现了超大的面推比^[12]。

4.3 中等升阻比的有翼锥柱体返回气动预示与控制技术

星舰再入返回采用低质阻比有翼外形设计，与传统航天飞机的返回方式不同，星舰再入时末端速度比较低，前后翼面在小、大攻角下均能实现对舰体姿态的有效控制，通过变攻角飞行，增加横向和纵向控制能力，提高落点精度，通过舵和 RCS 以实现制导和姿态稳定控制。

星舰中等升阻比气动布局在考虑外形包络、最大升阻比、最大横纵机动距离、容积效率、峰值过载、峰值动压、操稳特性、驻点热流及温度等多种约束，再入过程速度覆盖 0~25 马赫，迎角约 0°~40°，如此大的飞行包线，给控制技术提出严峻挑战。

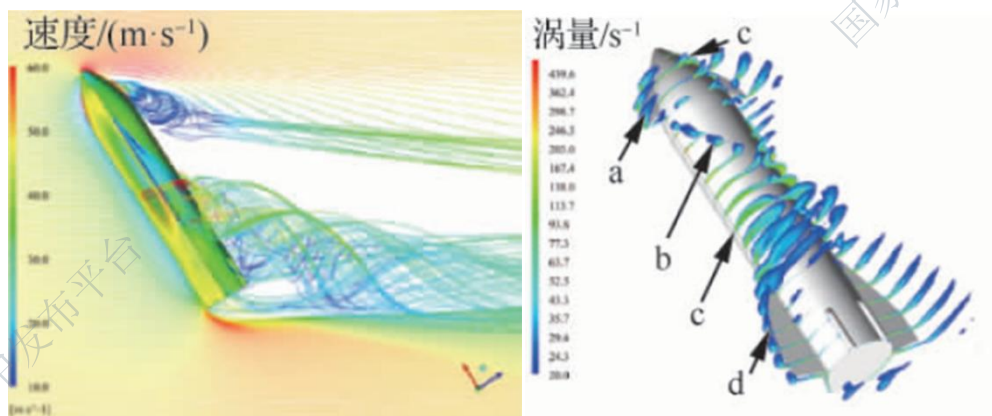


图 13 星舰气动特性仿真^[13]

4.4 超大箭体垂直起降导航制导与控制技术

超重返回飞行剖面复杂，外力作用复杂，超重火箭取消了着陆缓冲机构，采用新型发射塔架机械捕获回收技术，对在线导航制导与控制技术提出了更高的要求。超重火箭配套的栅格舵在高速飞行中具有良好的气动性能，能提供稳定控制力，辅助超重再入过程中姿态稳定控制。飞行剖面中按照调姿、减速、再入、着陆等不同飞行阶段的控制需求和特性，通过不同执行机构的有效配合，完成精确着陆控制。

4.5 新型发射回收技术

超重-星舰采用无导流槽发射技术，降低对发射场的建设要求；采用发射塔架机械捕获式的方式，降低对着陆缓冲系统的研制难度，提升火箭运作周期。



图 14 发射台和发射塔架机械捕获示意图^[14]

4.6 快速检测及更换的轨道级返回大热流防护技术

星舰再入时以 60° 倾斜的姿态及 25 倍音速的超高速进入大气层，再入时速度高、动压大，其热流条件与航天飞机一致^[7]。返回过程中，箭体将承受上千度的热冲刷，星舰采用的不锈钢材料承受的高温在 800°C 以上，背风面可以在没有任何附加热防护的情况下完好撑过再入过程。星舰防热系统采用 X-37B 成熟应用的整体增韧抗氧化陶瓷隔热瓦，该防热结构与不锈钢结构栓接，

连接可控，更换简洁。

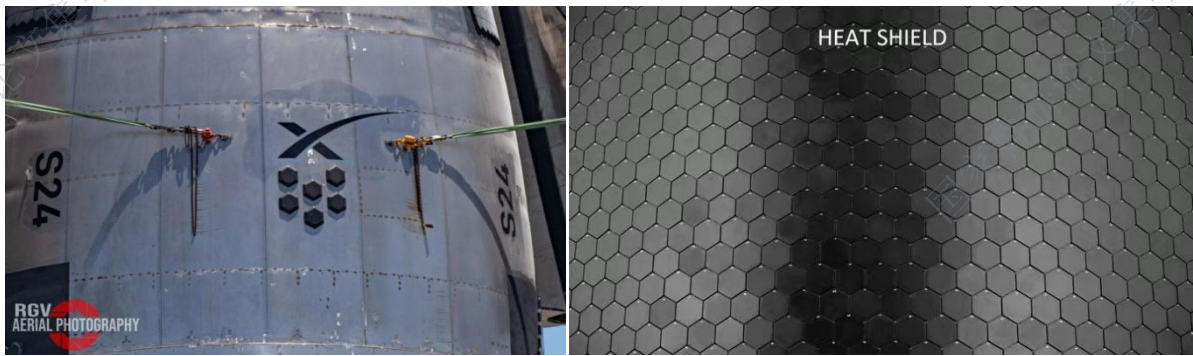


图 15 星舰隔热材料

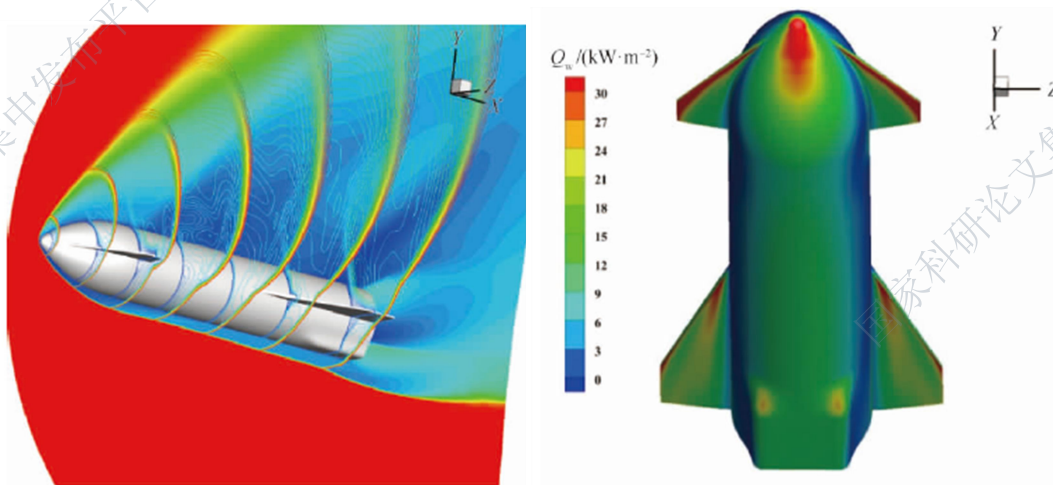


图 16 星舰热环境预示分析^[13]

4.7 复杂剖面推进剂管理技术

星舰着陆前存在大角度姿态机动箭体快速拉直的飞行工况，此时推进剂处于浅箱状态，将大量存在气液混合现象，推进剂晃动幅度也达到 20%以上，SN 多次飞行失败主要原因就是推进剂管理的原因。传统的推进剂管理方案无法满足其再入着陆的工况需求。星舰采用小贮箱的推进剂管理模式，在返回再次点火前，先通过小贮箱实现发动机点火，之后切换回大贮箱。

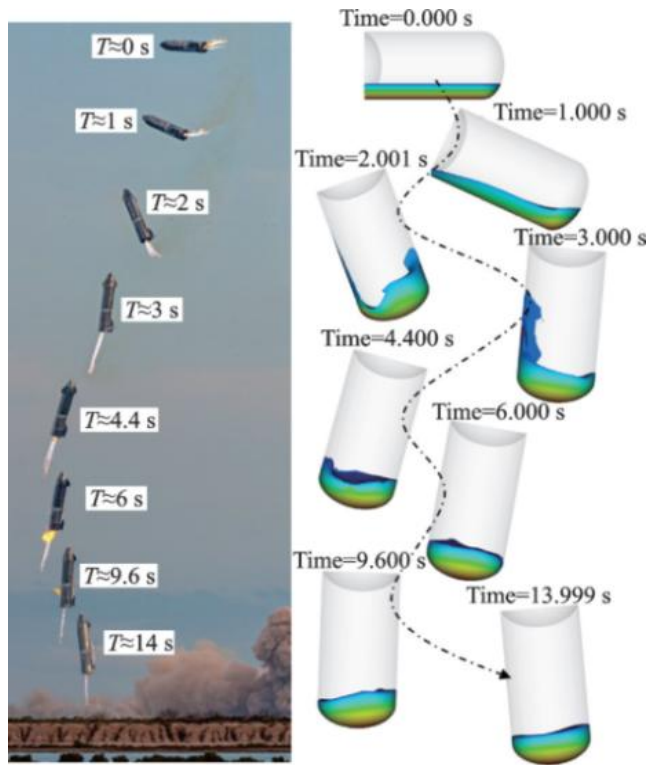


图 17 星舰推进剂晃动情况 [11]

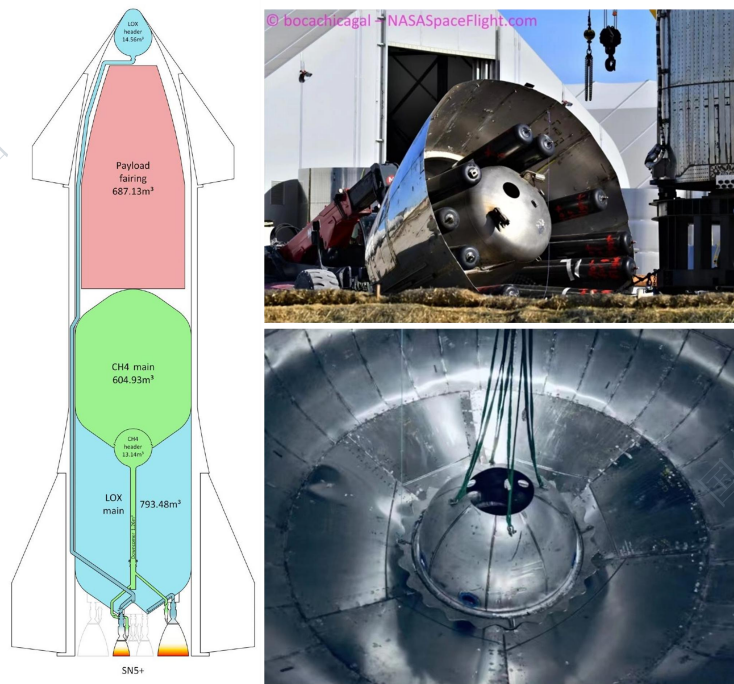


图 18 Headtank 推进剂管理方式 [9]

5 超重-星舰对航天产业的影响分析

运载是航天活动的基础，是撬动整个航天产业的支点，运载费用的大幅下降，对整个航天产业的溢出效应极其明显，航天产业技术及应用迭代速度将大大加快，影响到航天系统的方方

面面。

(1) 星舰实现航班化运输后，航天发射效率大幅提高和成本大幅降低。根据 SpaceX 公司介绍，“超重-星舰”运载器设计重复使用次数在 50 次以上，复用周期一天，可将进入地球轨道的费用降低到 1000 美元每千克甚至更低，航天运输的发射效率和价格将彻底改变。

(2) 航天产业的生存制造模型将发生颠覆性的变化。例如在星链星座的建设中，星链在俄乌战争中表现优异，但 4.2 万颗星链的卫星发射任务对运载的挑战极大，如采用星舰仅需要 105 次发射，理想状态仅需生产 3 枚运输器即可完成整个卫星网络的部署，极大降低运载火箭的生产制造压力。

(3) 航天产业的产值将大幅提高。根据美银美林集团（Bank of America Merrill Lynch）的测算，到 2050 年，整个太空产业的产值将达到 30 万亿的级别。星舰的出现，是建立整个航天产业新生态的关键，运载效率的提升和运载费用的下降，将颠覆整个航天产业的应用模式，快速推动空间技术的迭代更新。

6 超重-星舰对中国的启示与建议

(1) 加快培育创新和风险投资的适宜环境

SpaceX 公司崛起源于创新和风险投资。工业单命以来的创新和风险投资不仅仅指技术创新和现代意义上的投资机构对初创企业的支持，它是一切对创新和创业活动进行支持的机制，它是一个国家和社会具有挑战与质疑传统和权威的氛围，具有接纳与包容新思想、新产品和新模式的能力。

遵循“科技创新、自立自强”的要求，持续改革开放，动员市场的力量，鼓励企业家精神，加大研发投入，鼓励各种风险资本投资于我国急需的技术和产品，探索和完善一个与中国国情相适应的风险投资市场，支持自主创新。

(2) 加强对航天运输的投入和政策引导

航天、芯片、软件等高科技产业是国家之间的产业竞争，事实上不仅仅取决于企业的创新能力，也取决于政府对牵引技术的预见能力及支持力度。航天运输早期阶段是一个创新风险极大，回报率极低的产业，需要政府在前期提供政策条件，承担部分技术创新的早期风险，吸引企业投身技术集成创新的应用。进一步细化、落实对航天产业发展的政策，指引航天技术发展的方向，去垄断、促竞争，实现整个国家航天领域的经济增长与科技进步。

(3) 推动运载火箭研制体系的迭代升级

不同于汽车和航空产业的大规模市场需求驱动，运载发射仅仅占整个航天产业的 1.5%-2%，产出效益低使得发射费用高，产品服役周期长，迭代更新缓慢。但运载是进入空间的入口，运

载迭代的缓慢导致整个航天产业发展受限。

SpaceX 引入产业互联网重塑运载火箭的研制流程，采用多次“设计、开发、试错”的研发模式。打破火箭研制由几百家工程协作的体制变为一家单位包揽 80%研发，电气、控制、材料等对接大市场模式，通过风险投资的预期盈利驱动，大力发展星链等应用业务强力驱动运载火箭迭代发展，目前已实现整个研发、应用、盈利、估值的正循环，其资本利用的效率远高于传统航天企业。

随着未来航天产业的蓬勃发展，必须打破现有火箭产品利润驱动成长模式。建议以军事需求为牵引，卫星应用投资来推动运载火箭研制理念的快速迭代升级，大力推动领域融合，构建军民共用的商业闭环模式，引领企业复利稳定增长，实现技术的最终跨代。

参考文献：

- [1] 微信公众号全球航天事件：记一次成功的飞行试验：首飞星舰自主离开轨道发射台、越过 MaxQ、终止于级间分离前。https://mp.weixin.qq.com/s/3yqk61AActcQlh2tFG_gCA
- [2] SpaceX 官方网站.<https://www.spacex.com/vehicles/starship/>.
- [3] 知乎专栏 RAVV 前沿科技：首次成功着陆：SpaceX 星舰试飞实现突破！
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/374950674>
- [4] 微信公众号 SPACE 太空未来. SpaceX 星舰超重鹰(Starship&SuperHeavy)“进化”指南.
<https://mp.weixin.qq.com/s/s7zXmQW193BFXD35XO5ZiA>.
- [5] 王林,杨开. 美国"火箭货运"方案及难点分析[J]. 国际太空,2022(3):24-27.
- [6] 知乎我们的太空：空天跨域！地球一小时快递！
<https://www.zhihu.com/pin/1292377265134022656>
- [7] 微信公众号三体引力波：马斯克为何重申星舰星链之间关系？
<https://mp.weixin.qq.com/s/c9rbr8ytrnAYzMEuLT3emQ>
- [8] 微信公众号三体引力波：SpaceX 再度突破复用新极限：一箭 13 飞 13 回收
https://mp.weixin.qq.com/s/Cl-_Rr9BHQc_-CpHifR6HQ
- [9] <https://www.elonx.net/super-heavy-starship-compendium/>
- [10] 微信公众号三体引力波：马斯克为何重申星舰星链之间关系？
<https://mp.weixin.qq.com/s/c9rbr8ytrnAYzMEuLT3emQ>

[11] 罗盟, 陈士强, 李大鹏,等. 星舰动力特点及再入过程推进剂流动仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S01):8.

[12] 网易新闻. 马斯克透露了一点点猛禽 2 代发动机的进展.

<https://www.163.com/dy/article/HA75J9LS05533263.html>.

[13] 张宇佳, 左光, 徐艺哲,等. Starship 新型舵面形式气动特性数值模拟[J]. 航空学报, 2021.

[14] 冯国峰, 杨毅强, 胡小伟,等. "星舰"发射支持系统特点与分析[J]. 中国航天, 2022(11):4.