

“超重 - 星箭”的 “猛禽”发动机

■ 杨浩亮¹ 杨毅强² 王英诚¹ 明爱珍¹ 李洗²

(1 北京中科宇航技术有限公司 2 中国科学院力学研究所)

“强结构、弱动力”是猎鹰 - 9 (Falcon - 9) 火箭的印记, “弱结构, 强动力”则是“超重 - 星舰” (Super-heavy Starship) 的标志。“超重 - 星舰”的箭体结构并不出色, 它的厉害之处实际上是“猛禽” (Raptor) 全流量液氧甲烷火箭发动机。“猛禽”发动机被国外评为了目前世界上发动机的性能之王, 它是世界上第一款实用化飞行的全流量分级燃烧火箭发动机。

1 “超重 - 星舰”介绍

“超重 - 星舰”是目前世界上最强的运载飞行器, 为两级完全可重复使用运载器。它的总高约 120m, 起飞总质量约 5200t, 起飞推力约 7600t。不回收状态运载能力 250t, 两级重复使用状态近地轨道运载能力 150t。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, 中圈内为 13 台发动机, 可实现 $\pm 15^\circ$ 双向摇摆, 外圈 20 台发动机固定不摇摆。“星

舰”高 50m, 直径 9m, 内部含 6 台“猛禽”液氧甲烷发动机, 3 台海平面型和 3 台真空型。“超重 - 星舰”的主要目标为: “星链” (Starlink) 部署、火星登陆和洲际运输。

2023 年 4 月 20 日, 美国太空探索技术公司 (SpaceX) 发射了革命性的、有史以来最大的“超重 - 星舰”, 起飞后, 6 台发动机相继发生故障, 飞行约 239s 后, 箭体爆炸解体。首次飞行虽然失利, 但是失控后火箭的旋转证明了壳体的高强度——大

型结构在空中旋转，没有解体，直至收到自毁指令。从技术角度，“超重－星舰”的箭体结构设计是工业化产能的需求，而其真正厉害之处是它采用的“猛禽”二代全流量液氧甲烷火箭发动机。

2 “猛禽”发动机特点

泵压发动机主要有三种形式：燃气发生器循环、高压补燃循环、全流量分级燃烧循环三大类。

SpaceX 公司要去火星，需要推力更大的可重复使用发动机，Falcon－9 火箭的灰背隼－1D (Merlin－1D) 发动机已经开发到了极限，SpaceX 公司研制的“猛禽”，则是直接步入顶级的分级燃烧循环技术。“猛禽”是全世界第三个制造实体全流量分级燃烧循环的发动机，并且是目前唯一应用于飞行的发动机。

全流量分级燃烧

目前，世界最领先的发动机燃烧技术是全流量分级燃烧，可实现最高燃烧效率，SpaceX 公司的“猛禽”发动机即采用这一循环方式，其当前燃烧效率

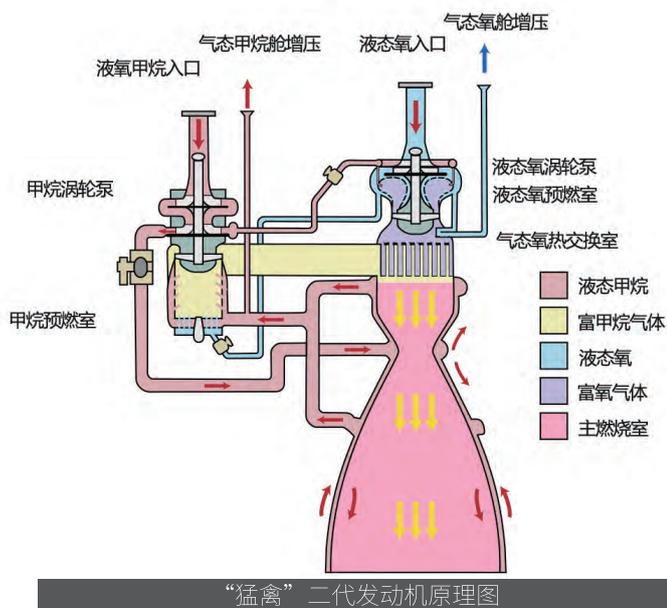
高达 99%。“猛禽”发动机同时具有富燃和富氧燃烧状态，工作过程中，大流量燃和小流量氧先输送到富燃预燃室进行燃烧，驱动高压燃料泵的涡轮；同时，大流量氧和小流量燃先输送到富氧预燃室进行燃烧，驱动高压氧料泵的涡轮；燃泵和氧泵分别泵送主燃和主氧进入推力室，协同从富氧和富燃出来的所有燃气共同进入主燃烧室燃烧，通过喷管产生压力。

采用双低温推进剂液氧和甲烷，外加全流量低温推进剂通过燃气发生器的预燃烧室，其提供天然的再生冷却，从而保障涡轮在低温下的正常工作，冷却效果优于仅有部分燃料通过预燃室的高压补燃火箭发动机，即保障输出更大的功率。从而给发动机的燃烧室提供更大的室压，进而提升推力和比冲。考虑到高温富氧燃气对金属结构的气蚀效应，SpaceX 公司在原材料上采用 SX500 高温合金，保障在高低温工况下的强度。

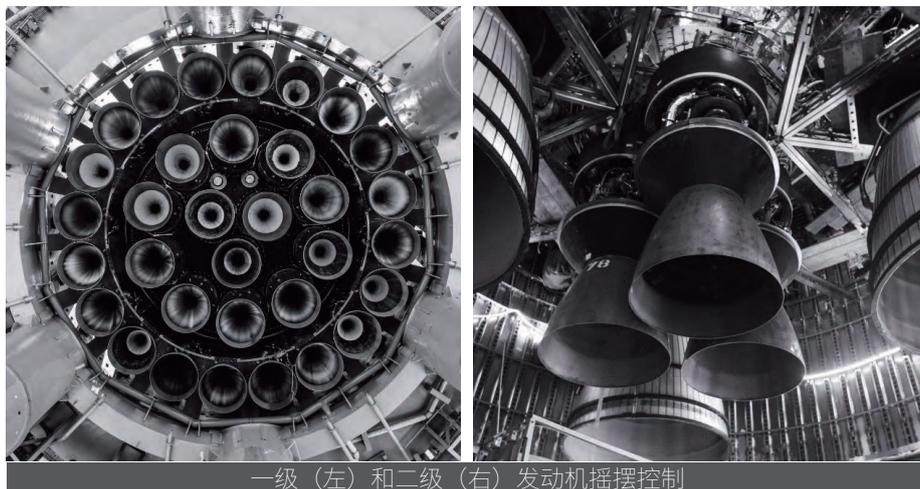
控制 15°大摆角

为满足飞行或回收过程中不断变化的质心持续传递动力，“猛禽”满足双向摇摆 15°，相较于 RS－25 发动机的 12.5° 和 Merlin－1D 发动机的 5°，大幅度提升了摆动范围。SpaceX 公司之所以这么做，是为了在“超重－星舰”高空飞行测试中，当飞行至 10km 时持续保持尽可能低的加速度，在发动机达到最低油门点时关闭发动机。当一个发动机关闭时，它会迅速向外摆动，其他两台发动机需要快速且大范围转向让火箭姿态平衡，也是引导发动机满足箭体整体扭矩的需求。

在“超重－星舰”的一级上，外圈的发动机不具备摇摆功能。中心的 13 台发动机采用伺服控制姿态推力偏差的方式控制姿态，即外侧发动机进行节流。



“猛禽”二代发动机原理图



一级（左）和二级（右）发动机摇摆控制

持续优化升级“提压减重”

2022年，“猛禽”二代开始取代“猛禽”一代（退役）。从整体外观上看，“猛禽”一代周身上布满了管路和电缆，在研发过程中，周身的电缆和管路连着压力、流量、温度等传感器，辅助系统设计时序、流量控制等。而“猛禽”二代则简洁很多，很多的阀门统一到了几个阀门盒中，满足马斯克对“猛禽”发动机的设计理念——“最好的部分就是没有任何部分”。取消的电缆和敏感原件，使“猛禽”

二代更加耐火和耐热。“猛禽”二代不但取消了隔热罩，还取消了主燃烧室的点火器，当煤油和液氧进入主燃烧室时，作为极热气体，具有气-气相互作用，使得推进剂能够完全混合并相互作用，在适当的条件和精确的时序设置下充分燃烧。除此之外，“猛禽”二代在工艺上也做了简化，用更多的焊接结构代替了法兰结构实现大幅度减重和提高密封性能。在点火方面，“猛禽”二代删除了燃烧室里的双冗余点火器，巧妙利用燃烧室高温高压工作环境，让充分

“猛禽”发动机型号具体参数

型号	“猛禽”一代	“猛禽”二代	“猛禽”真空版
混合比	3.6	3.6	3.6
室压 /MPa	25	30	30
海平面推力 /kN	1850	2300	—
海平面比冲 /s	330	327	—
真空推力 /kN	—	—	2600
真空比冲 /s	—	—	363
喷管面积比	34.34	34.34	80
推重比	92.5	143.75	—
包络尺寸 /m×m	1.3×3.1	1.3×3.1	3.8×5
推力调节范围	40% ~ 100%	40% ~ 100%	—
质量 /kg	2000	1600	—

混合的高热氧气和甲烷气体直接变成自燃推进剂。

在推力室方面，“猛禽”二代将喉部扩大，满足更多的推进剂流通，降低了膨胀比和效率，但增加了推力。“猛禽”一代和二代虽然规格差不多，但是在“星舰”安装上并不兼容。它们高度均为3m，喷管出口为1.3m直径，相较于“航天发射系统”（SLS）的RS-25发动机，“猛禽”不仅体积小很多，质量也轻很多。“猛禽”一代的质量大约为2t，而“猛禽”二代的质量大约为1.6t。“猛禽”一代的稳定推力大约为185t，基本和RS-25相同，而“猛禽”二代的推力则达到了230t，推力的增加主要源于燃烧室压的增加，“猛禽”一代的室压大约

为25MPa，“猛禽”二代的室压可达到30MPa，甚至更高。作为参考，俄罗斯的RD-180液氧煤油发动机的最大室压为26.7MPa。比冲方面，“猛禽”一代的海平面比冲为330s，而“猛禽”二代的比冲为327s，纸面上看着是一种倒退，但是一级飞行的起飞决定因素是推重比，比起高比冲，实际做功更多，可提供更多的推力增量和加速度，相较于效率，提高更为明显。

“猛禽”一代和“猛禽”二代在发动机的使用材料上没有太大变化。但是在制造工艺上，“猛禽”二代开始逐渐摆脱3D打印结构件，以便生产和制造零部件更快速且成本更低。目前，“猛禽”二代是飞行应用方面的主力产品。



“猛禽”一代（左）和“猛禽”二代（右）的实物对比

“猛禽”的高效产能和快速迭代

随着“星舰”的连续使用，“猛禽”发动机越来越便宜，可重复使用代表着能够很大程度上降低成本。但SpaceX公司的梦想很大，未来的目标是让“超重-星舰”成为日常的航天交通工具。在产能方面，2021年，“猛禽”的产能为1台/天，2022年的产能已经达到2台/天。

近期，在“超重-星舰”首飞一个月后，SpaceX公司就完成“猛禽”三代并成功点火，发动机再次提升室压，可达35MPa，推力达269t，升级迭代速度可按月计算。

3 “猛禽”发动机的主要竞争对手

BE-4液氧甲烷发动机

“猛禽”发动机直接的竞争对手是美国蓝源公司（Blue Origin）的BE-4，这是一款液氧甲烷燃料富氧分级燃烧循环火箭发动机，且可变推力，可实现100次以上复用，全推力状态下8°摇摆。BE-4不仅将用在自己公司的“新格伦”（New Glenn）上，还将安装到美国联合发射联盟公司（ULA）的“火神”（Vulcan）火箭上进行测试。大体上来说，受



	Merlin	RD-180	F-1	Raptor	BE-4	RS-25
循环方式	开式	富氧闭式	开式	全流量循环	富氧闭式	富燃闭式
燃料	煤油	煤油	煤油	甲烷	甲烷	液氢
推力/MN	0.84	3.83	6.77	2.00	~2.40	1.86
推重比	198:1	78:1	94:1	107:1	~80:1	73:1
比冲/s	282 (海平面) 311 (真空)	311 (海平面) 338 (真空)	263 (海平面) 304 (真空)	330 (海平面) ~350 (真空)	~310 (海平面) ~340 (真空)	366 (海平面) 452 (真空)
室压/MPa	9.7	25.7	7	27	~13.5	20.6

国外主流发动机对比图

限于 ULA 公司的整体研制进度, BE - 4 虽完成多轮长程可靠性试车, 但其技术成熟度和迭代效率大大不如“猛禽”发动机。BE - 4 采用富氧分级燃烧循环, 尽管设计推力 270t, 但是以关键指标燃烧室压力作对比, BE - 4 只有 13.4MPa, 仅仅是“猛禽”三代的 38%, 其造价为 800 万美元。

RS - 25 氢氧发动机

作为“超重 - 星舰”的主要竞争对手, 美国国家队的 SLS 是一款两级火箭。芯一级配有 4 台 RS - 25 分级燃烧循环氢氧发动机, 助推器是 1600t 固体助推器。RS - 25 氢氧发动机是目前世界上最先进的氢氧发动机, 有着高达 366s 的海平面比冲和 452s 真空比冲。因为液氢的密度非常低, 所以其体积很大, 要想把足够质量的液氢送入燃烧室就需要相对复杂的输送系统。在密封上, 也比液氧甲烷发动机难很多。RS - 25 制造商生产目标是每年生产 4 ~ 8 台 RS - 25 发动机, 每台发动机的成本超过 5000 万美元。作为火箭的迭代升级, SpaceX 公司的最大优势就是: 强大的生产效率。SpaceX 公司的最新目标是每年能生产 2000 台“猛禽”发动机, 成本是 25 万美元。“星舰”已经成为了美国国家航空航天局 (NASA) “阿尔忒弥斯” (Artemis) 登月计划“载人着陆系统”的备选方案之一, 该计划

拟将载人往返月球表面和月球空间站。

RD - 180 液氧煤油发动机

俄罗斯的 RD - 180 液氧煤油发动机是一款双燃烧室、双喷嘴的火箭发动机, 在性能上表现出极优的性质, 是“深空探测与载人登月”的标版样机。由 RD - 170 系列衍生而来, 采用共享涡轮泵。RD - 180 以煤油和液氧为推进剂, 使用高压分级燃烧循环。RD - 180 最初应用于苏联的“能源” (Energia) 重型运载火箭第一级, 1996 年, RD - 180 火箭发动机用于“宇宙神” (Atlas) 运载火箭第一级。对美国售价为每套 1000 万美元 (比 RS - 68 液氢 - 液氧发动机便宜约 50%)。随着俄美关系恶化, 美国不再采用 RD - 180, 剩余的 10 余枚宇宙神 - 5 (Atlas - 5) 火箭也主要用于商业发射任务, 即亚马逊公司 (Amazon) 的“柯伊伯” (Kuiper) 星座建设。

4 总结

SpaceX 公司从 2012 年开始研制“猛禽”发动机, 历经整整 11 年, 从猛禽 - V1.0/V1.5/V2.0/V2.5, 一直到最新版猛禽 - V3.0, 性能提升都是跨越式进化。发动机推力从 185t 猛增到 269t, 性能提

升率达到了惊人的 45%。

运载火箭的能力取决于火箭发动机的能力。火箭和发动机的迭代升级，最有效的保障措施依托于强大的生产效率。SpaceX 公司从开始的蹒跚学

步，到后续的振翅高飞，从最初的燃气发生器循环 Merlin - 1A 发动机，到今天“猛禽”二代的工业化生产、再到“猛禽”三代的快速验证，均源于 SpaceX 公司的理念：快速试验、快速迭代。

参考文献

- [1] 张小平, 周亚强, 严伟. 液氧甲烷发动机发展现状 [J]. 载人航天, 2023, 29 (1) :126-133.
- [2] 田丰. 通过环评, 星箭发射终于获得绿灯放行 [J]. 太空探索, 2022 (8) :50-57.
- [3] 杨开, 才满瑞. 国外液氧 / 甲烷发动机的最新进展 [J]. 中国航天, 2017 (10) :14-19.
- [4] 孙郡, 宋杰, 李清廉, 等. 液氧甲烷变推力火箭发动机再生冷却特性研究 [J]. 载人航天, 2022, 28 (1) :22-29.
- [5] 杨浩亮, 杨毅强, 廉洁, 等. 商业可重复使用火箭 关键技术与创新 [J]. 中国航天, 2022 (11) :8-14.
- [6] 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) :31-34.
- [7] Chris Palmer. SpaceX Starship lands on earth, but manned missions to mars will require more[J]. Engineering, 2021, 7 (10) :1345-1347.
- [8] Leah Crane. Starship launches, then explodes[J]. New Scientist, 2023 (258) :3436-3450.
- [9] ZHOU C, YU N, REN J, et al. The influence law of the film percentage and injection on gas film cooling effect of the liquid oxygen/methane attitude control engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2023 (220) :119717-119725.
- [10] Chang K. The SpaceX test rocket for Mars goes up again, and explodes again[EB/OL]. (2021-07-07) .<https://www.nytimes.com//science/space/spacex-starship-launch.html>.
- [11] Chang K, Roston M. SpaceX successfully lands prototype of Mars and Moon rocket after test flight[EB/OL]. (2021-07-07) .<https://www.nytimes.com/2021/05/05/science/spacex-starship-launch.html>.
- [12] Solon O. Elon Musk: we must colonise Mars to preserve our species in a third world war[EB/OL]. (2020-06-07) .<https://www.theguardian.com/technology/2018/mar/11/elon-musk-colonise-mars-third-world-war>.
- [13] Sheetz M. Elon Musk is ‘highly confident’ SpaceX will land humans on Mars by 2026[EB/OL]. (2021-08-09) .<https://www.cnbc.com/2020/12/01/elon-musk-highly-confident-spacex-will-land-humans-on-mars-by-2026.html>.
- [14] Wattles J. SpaceX likely to miss July date for Mars rocket test[EB/OL]. (2021-06-16) .<https://www.cnn.com/2021/06/15/business/spacex-orbital-test-scn/index.html>.
- [15] Brown M. SpaceX Starship: map and schedule for Elon Musk’s ambitious orbital flight[EB/OL]. (2021-05-20) .<https://www.inverse.com/innovation/spacex-starship-first-orbital-flight>.
- [16] Sheetz M. SpaceX bought two former Valaris oil rigs to build floating launchpads for its Starship rocket[EB/OL]. (2021-01-19) .<https://www.cnbc.com/2021/01/19/spacex-bought-former-valaris-oil-rigs-to-build-starship-launchpads>.
- [17] C. Palmer. Astronauts hitch first ride aboard private rocket to space station[J]. Engineering, 2023 (6) :1207-1209.