

商业航天火箭行业深度报告（上）：

推荐（维持）

航天发射次数再创新高，技术革新促进降本增效

2024年8月23日

投资要点

- 运载火箭是航天运输的主要载具，其自身携带推进剂，靠火箭发动机喷射产生的反作用力向前推进，能够把卫星、载人飞船等有效载荷送入预定轨道。运载火箭一般由箭体结构、推进系统、控制系统三大部分构成。
- 固/液火箭没有绝对优劣，满足差异化使用场景为先。固体火箭采用固体推进剂，贮存在发动机燃烧室内，无需贮箱和输送系统；液体火箭采用液体推进剂，分别贮存在火箭的氧化剂箱和燃料箱内，工作时由输送系统将它们送入发动机的燃烧室。液体火箭具有更高的比冲，运力优势显著；固体火箭无需加注，发射周期明显短于液体火箭，且方便维护可长期贮存。固体火箭适合商业航天领域初创企业选用，投入成本低，首发成功率高，另也尤为适用于军事火箭等需要卫星快速响应发射的场景；液体火箭适合非紧急发射场景下的卫星大规模组网发射任务，可实现一箭多星，进一步在商业航天市场降本增效。
- 液氧甲烷推进剂在液体火箭中具有较大潜在价值。目前以液氧液氢、液氧煤油、液氧甲烷为代表的低温推进剂体系液体火箭在可重复性方面已得到验证。液氧甲烷发动机对比四氧化二氮、偏二甲肼等常温推进剂无毒、环境友好；对比液氧煤油发动机，比冲更高、不易结焦、发动机复用性更高；尽管液氧液氢发动机比冲最高，但液态甲烷的制备成本仅为液氢的 1/70。商业航天需要在成本和性能之间获取平衡，液氧甲烷发动机综合优势突出，或为民营火箭公司的长期选择。
- 采用重复回收技术的 SpaceX 的猎鹰 9 号火箭降本成效显著。SpaceX 的猎鹰 9 号火箭最大使用次数可达 10 次，其制造成本为 5000 万美元，包括一级火箭和整流罩在内的 3500 万美元初始成本，和推进剂、发射测控、翻修等相关费用在内的 1500 万美元边际成本。猎鹰 9 号火箭 LEO 轨道理论载荷为 22.8 吨，采用重复回收方式的最大实际载荷为 17.4 吨，运载能力损耗约 23.68%。若以 17.4 吨作为考虑运力损耗的单次发射实际载荷，则发射 2 次火箭（复用 1 次）的载荷合计为 34.8 吨，每千克载荷分摊的制造成本为 1867.82 美元；发射 10 次火箭（复用 9 次）的载荷合计为 174 吨，每千克载荷分摊的火箭制造成本为 1063.22 美元，较复用 1 次的单位成本下降 43.08%，较不回收的单位成本下降 63%。猎鹰 9 号每千克载荷发射报价为 2684 美元，若以 1063.22 美元作为每千克载荷制造成本，则发射 10 次的猎鹰 9 号利润率可达 60.39%。
- 降低成本是商业航天实现闭环的关键要素，火箭可回收技术或为降本突破口。商业航天火箭制造商若想抢占发射服务市场则需进一步拓展降本增效的新边界，火箭降本方案主要包括火箭回收；采用通用化设计；整合产业链。硬件成本在火箭总成本中占比较高，火箭回收复用可有效分摊硬件成本。相较于伞降回收、带翼飞回和陆地垂直回收，海上垂直回收具有火箭结构改动小、落地精确度高、可回收火箭核心部件等优势。采用通用化设计有利于通过规模效应不断摊薄火箭制造成本。整合产业链有利于核心技术自主可控，在管理协作方面降低成本。
- 风险提示：1) 卫星星座建设不及预期；2) 商业航天发展不及预期；3) 市场竞争加剧。

目录

1、运载火箭：航天运输主要载具	- 4 -
1.1、运载火箭概况	- 4 -
1.2、运载火箭构成	- 5 -
2、火箭发动机技术路径	- 7 -
2.1、固液火箭结构与工质区别造成性能差异	- 7 -
2.2、固液火箭各有特点不分优劣，满足差异化使用场景为先	- 10 -
2.3、液氧甲烷推动剂体系在可重复使用火箭中具有较大潜在价值	- 11 -
3、商业火箭的降本之路	- 13 -
3.1、商业航天成为运载火箭发展新浪潮	- 13 -
3.2、垂直起落或为火箭最可行的回收方案	- 17 -
3.3、商业火箭其他可行降本路径	- 21 -
3.4、国内外火箭回收技术现状	- 24 -
4、风险提示	- 28 -

图目录

图 1、长征十一号（CZ-11）运载火箭结构示意图	- 5 -
图 2、固体火箭结构示意图	- 7 -
图 3、液体火箭结构示意图	- 7 -
图 4、固体火箭发动机	- 8 -
图 5、液体火箭发动机	- 8 -
图 6、2019~2023 年全球航天发射次数及同比增速	- 14 -
图 7、主要运载火箭单发价格变化（百万美元/次）	- 15 -
图 8、火箭单发成本变化（以 21 年价格为基准）	- 15 -
图 9、发射运载火箭的成本构成	- 16 -
图 10、猎鹰 9 运载火箭发射成本结构	- 16 -
图 11、一级火箭成本占比	- 17 -
图 12、二级火箭成本占比	- 17 -
图 13、伞降回收方式示意图	- 18 -
图 14、“火神”火箭 SMART 回收方案	- 18 -
图 15、巴黎航展上贝加尔 1 号全尺寸试验飞行器	- 19 -
图 16、垂直起落方式示意图	- 19 -
图 17、SpaceX 海上垂直起落回收火箭	- 19 -
图 18、单发固体运载火箭箭体结构成本构成	- 23 -
图 19、批量生产时固体运载火箭箭体结构成本构成	- 23 -
图 20、SpaceX “猎鹰”系列火箭专利	- 24 -
图 21、SpaceX 火箭回收历程	- 25 -
图 22、深蓝航天百米级垂直回收试验	- 27 -
图 23、星河动力“火鸟”系列回收验证器规划	- 27 -

表目录

表 1、按能源分类运载火箭	- 4 -
表 2、按运载能力分类运载火箭	- 4 -
表 3、按结构形式分类运载火箭	- 5 -
表 4、固体燃料火箭和液体燃料火箭对比	- 10 -
表 5、液体推进剂理化等性能比较	- 12 -
表 6、三类低温推进剂组合参数性能比较	- 13 -
表 7、各国主流火箭发射服务价格	- 15 -
表 8、全新和复用“猎鹰-9”成本构成(单位: 万美元)	- 20 -
表 9、三种火箭回收方式	- 21 -
表 10、“猎鹰-9”型号迭代升级	- 26 -
表 11、我国可回收火箭技术进展	- 26 -

1、运载火箭：航天运输主要载具

1.1、运载火箭概况

运载火箭是自身携带全部推进剂，靠火箭发动机喷射工质(工作介质)产生的反作用力向前推进的飞行器，能够把人造地球卫星、载人飞船、货运飞船、空间站或空间探测器等有效载荷送入预定轨道，可在大气层内和大气层外飞行。

火箭可按照不同方式分类：（1）按能源分为化学火箭、核火箭、电火箭以及光子火箭等，其中化学火箭是目前最常见的火箭类型，化学火箭又分为液体推进剂火箭、固体推进剂火箭和固液混合推进剂火箭；（2）按运载能力分为小型运载火箭、中型运载火箭、大型运载火箭、重型运载火箭；（3）按级数分为单级火箭和多级火箭，多级火箭一般由 2-4 级组成，其中多级火箭按结构形式分为串联火箭、并联火箭和混合式火箭。

表 1、按能源分类运载火箭

类型		说明
化学火箭	固体火箭	用固体火箭发动机推进的火箭。固体火箭发动机由固体推进剂药柱、燃烧室壳体、喷管和点火装置组成。目前最常用的固体推进剂是由氧化剂（主要是高氯酸铵）、燃料（同时也是粘合剂）和轻金属（如铝粉）等组成的复合推进剂。
	液体火箭	用液体火箭发动机推进的火箭。它的动力装置包括推进剂贮箱和液体火箭发动机两部分。液体火箭发动机由推力室、推进剂输送系统和发动机控制系统等组成。
	固液混合火箭	固液混合火箭是采用液体氧化剂和固体燃料的混合火箭发动机推进的火箭。优点主要有安全性好、容易进行推力调节、可多次启动、推进剂能量较高、环保性好、药柱稳定性好、温度敏感性低、经济性好等。缺点主要有燃料燃速低、装填分数低、燃烧效率低、氧燃比会发生变化、喷管烧蚀严重等。
新能源火箭		包括电火箭、核能火箭和太阳能火箭。

资料：航天科技集团官网、《固液混合火箭发动机技术》（蔡国飙、田辉、俞南嘉）、《固液混合火箭发动机研究进展》（侯德飞、王鹏飞、孙勇强、曹熙炜），兴业证券经济与金融研究院整理

表 2、按运载能力分类运载火箭

类型	说明
小型运载火箭	近地轨道运载能力低于 2t 的运载火箭。
中型运载火箭	近地轨道运载能力在 2t-20t 的运载火箭。
大型运载火箭	近地轨道运载能力在 20t-100t 的运载火箭。
重型运载火箭	具备低、中、高轨道发射能力，近地轨道运载能力超过 100t，起飞推力达到 3000t 级的运载火箭。

资料：新华网，兴业证券经济与金融研究院整理

表 3、按结构形式分类运载火箭

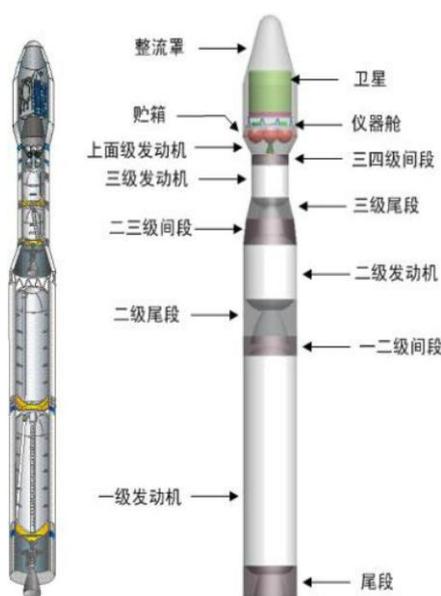
类型	说明
串联火箭	沿轴向连接成一个整体，结构紧凑，气动阻力小，发射设备简单。
并联火箭	各级沿横向连接，长度短，发射时所有的发动机可同时点火。缺点是箭体横向尺寸大，发射设备复杂，费用高。在相同起飞重量的前提下，并联式火箭的运载能力稍低于串联式火箭。
混合式火箭	串联和并联同时使用的组合方式，兼有上述两种方式的优点和缺点。

资料：中国百科全书官网，兴业证券经济与金融研究院整理

1.2、运载火箭构成

据《运载火箭及总体设计要求概论》（李福昌，余梦伦，朱维增），运载火箭一般由箭体结构、推进系统、控制系统三大部分构成。箭体结构是安装连接有效载荷、仪器设备、推进系统和储存推进剂，承受地面操作和飞行中的各种载荷，维持良好的外形以保证火箭的完整的装置。推进系统是产生推力，为推动火箭提供能源的装置。控制系统是控制火箭姿态稳定，使其按预定轨道飞行，及控制火箭发动机关机，达到预定的速度，将有效载荷送入预定的轨道的装置。

图 1、长征十一号（CZ-11）运载火箭结构示意图



资料：国家航天局，兴业证券经济与金融研究院整理

(1) 箭体结构

箭体结构是运载火箭的基础，用以维持火箭外形，将运载火箭各系统、组件连接在一起从而形成完整的箭体。据《运载火箭及总体设计要求概论》（李福昌，余梦伦，朱维增），箭体结构一般包括：有效载荷整流罩、推进剂贮箱、仪器舱、箱间段、级间段、发动机支承结构、仪器支架、导管、活门和尾段、尾翼等。有效载荷整流罩的作用是在大气层内飞行时保护有效载荷免受气动载荷及热流的影响，并使火箭维持良好的气动外形。飞出大气层后，整流罩即被抛弃，以减轻重量。推进剂贮箱占箭体结构的绝大部分，作用是储存推进剂，同时还是火箭的承力结构。级间段是多级火箭的级间连接部件，作用是级间热分离时，使上级发动机的喷流能顺畅排出。

(2) 推进系统

推进系统是推动运载火箭飞行并获得一定速度的装置。据《运载火箭及总体设计要求概论》（李福昌，余梦伦，朱维增），液体火箭的推进系统包括火箭发动机及推进剂输送系统两部分。液体火箭发动机目前一般采用泵式推进剂供应，按要求的流量和压力将推进剂泵入推力室，燃烧而产生推力。液体火箭的推进剂输送系统是按要求将推进剂从推进剂贮箱内输送到发动机泵入口的装置。推进剂贮箱内必须增压以保证泵不产生气蚀。大型运载火箭在输送系统中还设置了推进剂利用系统，作用是保证火箭在飞行时、在受各种内外干扰条件下，推进剂按预定混合比消耗，使剩余量最小，从而增大运载能力。据国家航天局，固体火箭的推进系统较为简单，主要部分是固体火箭发动机，推进剂直接装在发动机的燃烧室壳体内。

(3) 控制系统

控制系统是用来控制运载火箭沿预定轨道正常可靠飞行的装置。据《运载火箭及总体设计要求概论》，控制系统由制导、姿态控制和控制系统三部分组成。1) 制导系统由测量、控制装置和计算机等组成，作用是测量和计算火箭的位置、速度、加速度和轨道参数等，并与预先装定的参数比较，形成制导指令，通过导引信号控制火箭方向，使其沿一定的轨道飞行，并发出发动机关机指令，使有效载荷进入预定轨道。2) 姿态控制系统由敏感装置、计算机和执行机构组成。其中，敏感装置测量箭体姿态的变化并输出信号；计算机对各姿态信号和导引指令按一定控制规律进行运算、校正和放大并输出控制信号；执行机构根据控制信号产生控制力矩，控制火箭的姿态。3) 控制系统包括电源配电、时序和测试线路等，能够将制导、姿态控制组成一个完整系统。

据《火箭发动机理论基础》（宁超，田干），液体火箭发动机由推力室（由喷注器、燃烧室和喷管组成）、推进剂供应系统、推进剂贮箱和各种调节器等部分组成。大多数液体火箭发动机使用的是双组元推进剂，即氧化剂组元和燃烧剂组元，它们分别贮存在各自的贮箱中。这种发动机工作时，供应系统将两组元分别经各自的输送管道输送到发动机头部，由喷注器喷入燃烧室中燃烧，生成高压和高温的燃烧气体，燃气经喷管膨胀加速后，高速排出产生推动 或飞行器的推力。

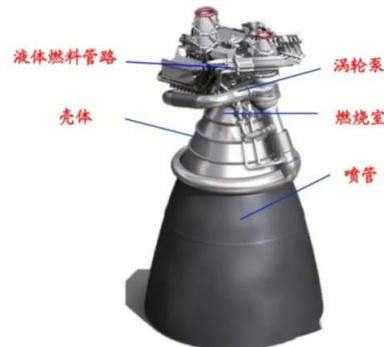
系统的可靠性等于系统内部各串联零部件可靠性的乘积。若单个零部件的可靠性相仿，系统内零部件数量越少，则整个系统的可靠性越高。据《火箭发动机理论基础》（宁超，田干），液体火箭发动机结构相比更加复杂，系统可靠性相对偏低。

图 4、固体火箭发动机



资料：NASA 官网，兴业证券经济与金融研究院整理

图 5、液体火箭发动机



资料：NASA 官网，兴业证券经济与金融研究院整理

2.1.2、火箭核心指标运载能力上，液体火箭具备明显优势

运载能力指火箭能送入预定轨道的有效载荷重量，代表了火箭进入太空的能力。据《火箭发动机理论基础》（杨月诚），固体推进剂能量密度较低，其比冲（单位推进剂的量所产生的冲量，用来表示推进系统的燃烧效率）范围约为 200-300s，而液体推进剂的比冲范围约为 250-460s（s 指 1 千克的物质产生 1 千克力的推力可以持续的秒数）。据中国航天报《各有千秋的液体和固体火箭发动机》（谢瑞强），比如美国“发现号”航天飞机的固体助推器推力高达 1250t，但真空比冲只有 242s，而其使用的 RS-25 主发动机 SSME（Space Shuttle Main Engine）则是真空比冲高达 452s 的高性能氢氧液体火箭发动机。根据齐奥尔科夫斯基公式，比冲的提高带来运力指数级的提升，SSME 比冲提高了约 70%，性能优势显

而易见。

2.1.3、固体火箭预装药，维护方便，可长期贮存，快速响应

据《火箭发动机理论基础》（杨月诚），液体火箭发射准备工作时间较长，维护使用相对不便。液态推进剂存在易挥发、腐蚀等风险，因此在临发射之前加注完成后，必须在一定时间内发射出去。据国家航天局官网，以常温推进剂四氧化二氮和偏二甲肼为例，它们加注后存储周期是7天左右；而低温推进剂液氢、液氧，它们的存储周期则只有1天，同时，发射前要做很多检查、维护、加注和泻放等勤务处理工作。据《火箭发动机理论基础》（杨月诚），固体火箭发动机结构简单，固体火药预先加工完成装入机体，且固体推进剂装药在运输和使用**时比液体推进剂安全得多，毒性也小**。可在发动机内保存时间可长达数年之久，随时处于战备待发状态，快速响应发射需求。据文昌航天城官网，长征十一号固体运载火箭可在24小时内完成发射准备。

2.1.4、小型固体火箭成本与技术难度低，但液体火箭仍具性价比和应用场景

据中国航天报《各有千秋的液体和固体火箭发动机》（谢瑞强），支持固体火箭的一派认为，一些大推力液体火箭发动机的研制难度很高，试验极为漫长，而小型固体火箭没有复杂的涡轮泵和推进剂输送系统，研制难度就要低得多。据卫星与网络《下半年，中国的大固体火箭将轮番登场》（张雪松），随着商业航天发展，对于大运力火箭的需求逐步提高，运载量大的中大型固体火箭却仍然存在诸多技术难点，比如高能/高比冲推进剂、大尺寸药柱浇筑、高性能壳体等多项技术仍待解决。据中科院力学研究所《固体火箭与“力箭一号”首飞成功的意义》（怡心），目前运送总载荷任务的火箭仍以相对技术较为成熟的液体火箭为主。当前，以小型固体火箭为主的国内商业运载火箭运载能力较低，导致了发射单颗卫星性价比很低，一颗卫星的研发成本有时候甚至还达不到一次发射服务价格的十分之一。据中国航天报《各有千秋的液体和固体火箭发动机》（谢瑞强），在国外市场，不管是SpaceX公司研制的猎鹰（Falcon）系列运载火箭，还是Blue Origin公司研制的新谢泼德（New Shepard）火箭和新格伦（New Glenn）火箭，均采用液体燃料作为动力。

表 4、固体燃料火箭和液体燃料火箭对比

项目	固体燃料火箭	液体燃料火箭
比冲	一般在 200-300s	一般在 250-460s
主要结构	主要有燃烧室壳体、固体推进剂装药、喷管和点火装置	主要有推力室（由喷注器、燃烧室和喷管组成）、推进剂供应系统、推进器贮箱和各种调节器
可控性	固体推进剂一旦被点燃，中止燃烧极其困难，无法多次起动，可控性差	通过阀门开关和动作，能够实现多次启动、脉冲工作和推力调节，可控性好
使用和维护	推进剂出厂前预先装填至燃烧室内，火箭整体运输至发射场，测试后即可实施发射，维护使用方便	推进剂在发射场实施加注，准备时间较长，不能长期储存，维护使用不便
可靠性	较高	较低
工作时间	一般不超过几分钟，时间较短	可较长时间工作
质量比	较高	较低
成本	小型固体发动机成本较低	一般较高
环境适应性	工作性能受外界环境温度（装药初温）影响较大	较高
运载能力	较低，主要以小型固体火箭为主	较高，重载荷火箭主流方案
箭体结构	较简单，推进剂贮存在发动机燃烧室内，无需贮箱和输送系统	复杂，推进剂贮存在氧化剂箱和燃料箱内，工作时由输送系统送入发动机燃烧室
发射周期	以长征十一号运载火箭为例，只需简单测试，24h 内可完成发射准备	较长，发射前需要转场、多轮测试、加注推进剂，如长三甲各环节完成约需 20 天
发射成本	整体较低，但低运载导致单位成本高	整体较高，但高运载可摊薄单位成本
储存周期	安全、无毒、可贮存达数年	低温推进剂 1 天，常温推进剂 7 天左右
技术难度	小型火箭难度小，但中大型火箭尚存在诸多技术难题尚未解决	零部件众多，推进剂输送系统等结构复杂，试验周期长。

资料：《火箭发动机理论基础》（杨月诚），国家航天局，文昌航天城，中科院力学研究所，中国航天报等，兴业证券经济与金融研究院整理

2.2、固液火箭各有特点不分优劣，满足差异化使用场景为先

运载火箭使用愿景是更具效率和更加经济的完成发射任务，两种火箭瞄准商业航天市场不同使用场景。据国家航天局 2019 年 08 月 27 日报道，固体火箭以其准备周期越短、保存时间长、简单便宜、安全可靠、易于转场搬迁的优势。因此，一方面适合商业航天领域初创企业选用，投入成本低，首发成功率高；另也尤为适用于卫星的快速响应发射场景，如卫星补网发射，军事火箭领域应用等。与之对应，液体火箭具有推力大、运载能力强、可控性高、单位成本低等优点。因此，适合非紧急发射场景下的卫星大规模组网发射任务，实现一箭多星，进一步在商业航天市场降本增效。长期视角下液体火箭和固体火箭都有广阔的各自专长的发展空间，固液并存的局面或将一直持续下去。

2.3、液氧甲烷推动剂体系在可重复使用火箭中具有较大潜在价值

大型液体火箭一般采用双组元推进剂，具体可细分为常温推进剂和低温推进剂，以四氧化二氮/偏二甲肼为代表的常温推进剂体系液体火箭发动机存在无法复用的问题，并且燃料本身具有毒害。目前以液氧液氢、液氧煤油、液氧甲烷为代表的低温推进剂体系液体火箭在可重复性方面已得到验证。

据《液体火箭主发动机技术现状与发展建议》（李斌），美国 SpaceX 公司研制的液氧煤油梅林-1D（Merlin-1D）发动机，9 台并联用于猎鹰-9（Falcon-9）火箭一子级，已实现回收复用；研制的液氧甲烷猛禽（Raptor）发动机，用于星舰第一级重型助推器（Super Heavy-Starship），可实现两级完全重用目标。Blue Origin 公司研制的富氧补燃液氧甲烷发动机 BE-4，用于新格伦（New Glenn）火箭和美国联合发射联盟（ULA，United Launch Alliance）下一代火神（Vulcan）火箭，均实现一子级回收复用。

2.3.1、液氧甲烷相比液氧液氢及液氧煤油具有综合优势

据《航天动力发展的生力军——液氧甲烷火箭发动机》（王维彬，孙纪国），液态甲烷正在成为继煤油、液氢等传统燃料之后的一种新型航天能源。液氧甲烷相比液氧液氢成本更低，比较液氧煤油可回收性能更好，综合优势决定液氧甲烷作为推进剂更具优势。据国家航天局官网发布的《液氧甲烷火箭发展概览》，在火箭储箱等结构设计上，液氧与甲烷沸点较为接近，不像液氧和液氢那样沸点温差悬殊。因此，选择清洁燃料时，液氧甲烷火箭便于使用低温推进剂共底储箱，从而有效降低储箱重量，缩短长度，促使火箭箭体减重，增强运载能力，还可以弥补在组合密度上的劣势。此外，甲烷的可挥发性强，因此储箱可以采用自生增压设计，进一步助力高效减重。据《Compatibility of hydrocarbon fuels with booster engine combustion chamber liners》（S. ROSENBERG and M. GAGE），发动机维护方面，甲烷结焦温度最高，煤油极限结焦温度最低，在含硫量低于 1 毫克/升时，甲烷几乎不会结焦，在燃烧过程中也几乎不产生积碳，而煤油则更易产生积碳。相比煤油，液氧甲烷体系发动机的可重复性更好。

表 5、液体推进剂理化等性能比较

项目	氢	氧	甲烷	煤油	偏二甲肼
沸点/K	20.38	90.2	112	466~547	336
密度(液态)/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	70	1140	422	836	791
临界压力/MPa	1.32	5.08	4.6	1.82	5.26
定压比热/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	15000	1700	3480	1980	2734
临界温度/K	33.23	154.8	190	658	521
结焦温度/K	无	无	950	560	无
毒性	无	无	无	微毒	剧毒
腐蚀性	极小	微小	无	微小	强烈
成本	高	较低	较低	较高	高

资料：《航天动力发展的生力军——液氧甲烷火箭发动机》（王维彬，孙纪国），兴业证券经济与金融研究院整理

液态甲烷使用安全性与液氢基本相同。甲烷没有毒性，且分子量较小，比空气轻，任何泄出或渗漏，都可以像氢一样，立即上升并散失在大气中，按照规则使用甲烷安全性较高。据《航天动力发展的生力军——液氧甲烷火箭发动机》（王维彬，孙纪国），液态甲烷 于液化天然气（LNG，Liquefied Natural Gas）和固态天然气水合物（又称“可燃冰”），在世界范围广泛存在着几乎是纯甲烷的天然气水合物资源，估算资源量为 $2\times 10^{13}\text{t}$ 。**液态甲烷的制备成本远低于液氢，是液氢的 1/70，是煤油的 1/3。**技术成熟情况下，液氧甲烷火箭相比液氧液氢火箭在成本上将会进一步降低。

液氧甲烷发动机的理论比冲比液氧液氢发动机低约 800m/s，比液氧煤油发动机高约 100m/s；密度比冲是液氧煤油的 0.84 倍，是氢氧发动机的 1.8 倍。**综合考虑火箭性能和结构重量，液氧甲烷发动机与液氧煤油发动机性能相当，但燃料成本更低，且发动机重复使用的维护性更好。**

表 6、三类低温推进剂组合参数性能比较

项目	液氧液氢	液氧甲烷	液氧煤油
理论真空比冲/s	475	390	378
理论密度真空比冲/s	163	323	389
平均密度/(g/cm ³)	0.344	0.829	1.03
结焦积碳情况	无结焦积碳	几乎无结焦积碳	较多结焦积碳, 需要清除
可重复使用性	理论上 100 次左右	目前约 30 次左右	目前 14 次左右
燃效稳定性	不稳定	比较稳定	比较稳定
发动机维护性	最佳, 无需清洁	较好, 极少需要清洁	最差, 回收后需要彻底清洁
安全性	最差, 氢气爆炸极限较宽	较好, 甲烷爆炸极限较窄	最好, 煤油相较不易挥发
技术实现难度	较高	较高	中等
成本	较高	中等	中等

资料：《航天动力发展的生力军——液氧甲烷火箭发动机》（王维彬，孙纪国），《液氧甲烷发动机研究进展与技术展望》（尹亮，刘伟强），《低温液体火箭发动机重复使用技术分析》（张楠，孙慧娟），新华网，iPEDIA 百科等，兴业证券经济与金融研究院整理

目前国内外液氧甲烷发动机的研制工作正在积极开展。据 Elon Musk 在 Twitter 的发文，2023 年 5 月，SpaceX 的猛禽液氧甲烷发动机成功通过一次 45 秒静态点火测试。据《发射火箭，为何液氧甲烷更具优势》（李成智，晓军），2023 年 7 月，蓝箭航天研制的朱雀二号遥二运载火箭使用天鹊 80 吨级液氧甲烷发动机，成为全球首款成功入轨的液氧甲烷火箭。液氧甲烷发动机因其同时具有液氧液氢发动机大推力、回收性好的优势和液氧煤油发动机成本较低、安全性好、燃料广泛的优点，此外还具有可用共底储箱，结构简化的独特之处，或将为未来商业航天领域液体火箭动力系统的主要发展方向。

3、商业火箭的降本之路

3.1、商业航天成为运载火箭发展新浪潮

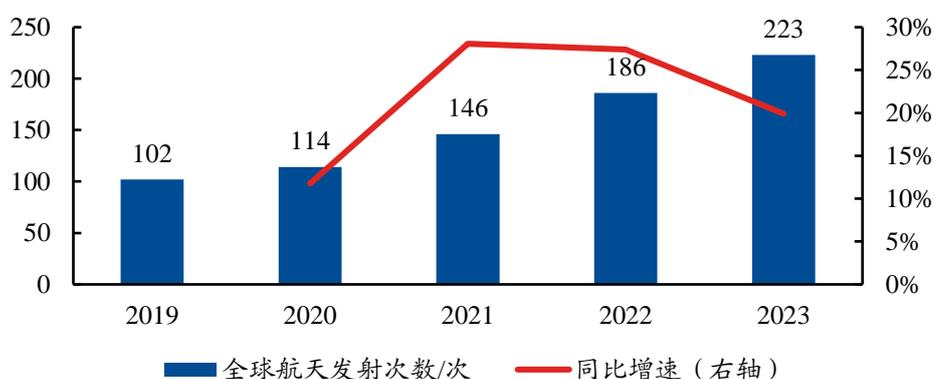
据北大纵横公众号，传统航天以任务保障为核心，偏向于计划、行政管理方式。在业务运营上以政府、军方计划需求为导向，国家体系内各院所同步进行资源配置，通过行政命令稳步向前推进。在支持体系上具有专门的人才系统、专项资金保障，在核算上采用成本加成法定价。美苏争霸时期，两国政府在航天领域投入大量资金。据《 时期苏联与美国外层空间竞争（1945-1969）》（范海虹），美国宇航局在 1961-1970 年间，向艾森豪威尔政府与肯尼迪政府提交的太空计划预算分别为 179.17、430.86 亿美元。水星计划（Project Mercury）是美国首个载人航天项目，1958-1963 年间共耗资约 4 亿美元；阿波罗计划（Project Apollo）是 NASA 在 1961 年-1972 年期间执行的载人登月项目，共耗资 254 亿美元。从 1966 年到 1970 年，苏联在外层空间项目的上投入总数为 79 亿卢布，按当时汇率换算

约为 240 亿美元，占苏联年均国民经济生产总值的 1.25% 左右。

随着竞争落下帷幕，完全依赖于政府投入的产业无法持续发展。据新华网《俄罗斯航天：走出历史，走向未来》，由于苏联解体前夕的动荡，航空航天部门的资金供应出现了严重的问题。苏联解体后，俄罗斯军工订单一落千丈，大批配套工厂倒闭或改行，到了 1994 年，俄航天业从业人数急剧减少 35%，专家流失 50%，航天部门不得不推出太空旅游等项目以解决政府投入不足的问题。

2023 年全球航天发射次数创新高，2019~2023 年全球航天发射次数从 102 次快速增长至 223 次，年均复合增速 21.60%。据《论商业航天概念内涵及我国商业航天发展现状》（汪夏，任迪，汪明哲），**商业航天活动是以市场机制配置资源，以企业为主体，以盈利为目的，以航天产品开发、系统运营、应用服务为核心的航天活动。**民营企业成为商业发射中坚力量，技术研发助力降本成为大势所趋。从美国的商业航天经历中，可以归纳出运载火箭发展的两个大趋势：1) 低轨空间的发射由国家主导逐步转向民营企业运营。2) 得益于火箭技术的不断发展，以及社会资本投入带来的资金支持，商业航天能够以更低的成本完成卫星发射任务，并不断的拓宽市场。

图 6、2019~2023 年全球航天发射次数及同比增速



资料：spaceworks，兴业证券经济与金融研究院整理

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/868074065010006122>