

国防军工

商业运载火箭专题报告

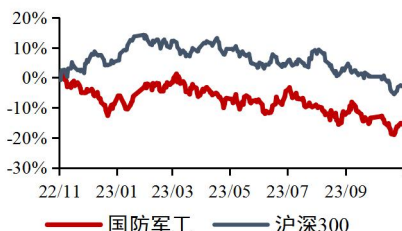
领先大市-A(维持)

商业运载火箭发展提速，打破商业航天运力瓶颈

2023 年 11 月 2 日

行业研究/行业专题报告

国防军工板块近一年市场表现



资料来源：最闻

首选股票		评级
002025.SZ	航天电器	增持-A
600879.SH	航天电子	增持-A
600862.SH	中航高科	增持-A
688375.SH	国博电子	增持-A
300593.SZ	新雷能	买入-A

相关报告：

【山证国防军工】景气度依旧较高，静待下半年需求释放-【山证军工】2023 年中报总结 2023.9.8

【山证国防军工】高强度竞争中异军突起，中国战斗机迎来新机遇-【山证军工】战斗机军贸专题报告 2023.8.17

分析师：

骆志伟

执业登记编码：S0760522050002

邮箱：luozhiwei@sxzq.com

李通

执业登记编码：S0760521110001

电话：010-83496308

邮箱：litong@sxzq.com

投资要点：

- **商业航天发展的瓶颈在火箭运力。**商业航天产业链总体包括四个环节：1) 电子元器件、材料及燃料厂商；2) 卫星研制商、发射服务提供商和地面设备制造商；3) 卫星运营商与卫星应用服务提供商；4) 终端用户（政府、企事业单位、个人）。运载是进入空间的入口，是连接卫星制造及卫星应用的中枢环节，对比 SpaceX 的运载能力，我国现役运载火箭运载能力偏低，急需大力发展中大型可重复使用液体运载火箭，来满足星座大规模部署所需的“低成本、高可靠、高频次”发射能力。
- **发展航天，动力先行。**火箭研发的瓶颈在发动机，动力系统直接决定了火箭推力与运载能力。目前液体和固体火箭发动机是火箭发动机中最基本、应用最广泛的两种发动机。固体火箭具有系统简单、发射准备周期短、发射点选择灵活等特点，在快速组网和补网等方面具有独特优势，但当需要大推力火箭来发射更重的载荷时，固体火箭发动机的技术难度和成本就会爆发式增长，固体火箭更适用于追求快速发射的小卫星需求。
- **液体火箭发动机是目前运载火箭主级或上面级的主要动力。**液体火箭发动机动力路线的选择主要从三方面考虑，即推进剂类型、推进剂供应方式与泵压式系统的循环方式。目前液体火箭发动机的推进剂组合主要包括液氧/液氢、液氧/煤油和液氧/甲烷。液氧/液氢比冲最高，性能优异，是无毒、绿色环保推进剂组合，但液氢温度极低，易泄露，混合空气后易爆炸，所以导致液氢液氧火箭发动机系统复杂，成本较高，不适应低成本发射需求的商业运载火箭。液氧/甲烷和液氧/煤油相比，液氧/甲烷发动机不易结焦积碳，具有低成本、使用维护方便、适于重复使用、比冲较高等特点，更加适宜于重复使用、低成本运载器的使用要求，已成为下一代液体运载火箭的理想动力选择。液氧甲烷发动机的概念早在 20 世纪 60 年代就已提出，但是航天大国苏联和美国的研究重点分别放在液氧煤油和液氧液氢发动机上，并没有给予足够重视。近年来随着可重复使用运载器动力需求的提出，更适宜重复使用的液氧/甲烷发动机受到商业航天公司的青睐，并涌现出一批不同成熟度的代表型号。
- **美国 SpaceX 凭借独一无二的火箭回收复用技术与高效运营，坐稳了全球运载第一把交椅。**SpaceX 公司用了 16 年时间，先后研制成功“猎鹰”-1、“猎鹰”-9 和“猎鹰”重型系列运载火箭，同时已经成功为 NASA 执行了多次国际空间站货运补给和载人航天飞行任务。猎鹰 9 系列火箭在 13 年中（截止 2023 年 10 月 10 日）已发射 263 次，其中 261 次成功（任务成功率 99.2%），



请务必阅读最后一页股票评级说明和免责声明

1



更多免费行业报告

并购家

www.ipoipo.cn

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

一子级成功回收 219 次，复用一子级发射 194 次，“猎鹰”系列火箭以出色的性能和低廉的价格，给世界航天带来大幅冲击和震动。SpaceX 低成本火箭的研发成功促成了“星链”计划的大规模建设，而“星链”计划的可观收入又将用于支持 SpaceX 未来火星探索和移民计划的巨大投资。“星链”星座补齐了 SpaceX 商业闭环，后续实践明显有助于军事利用。

➤ **运载火箭可复用技术创新是 SpaceX 火箭低成本的主要原因。**运载火箭可复用推动了发射成本实现数量级上的降低。SpaceX 通过突破发动机重启与推力控制技术、火箭下降控制系统技术以及重复使用火箭着陆系统技术，实现了火箭的垂直回收。在采用着陆架回收日趋成熟之后，2021 年 SpaceX 开始尝试采用发射塔架机械臂回收“超重”火箭级，进一步缩短两次发射任务之间的准备时间。

➤ **中国商业航天正迈入高速发展期。**2014 年后，中国航天产业向民营资本打开大门，商业航天迎来了快速发展期，在政策鼓励和资本助推下，商业航天公司数量持续增长，到 2020 年与运载火箭相关的企业就有十多家。国内大多数民营运载火箭公司选择从研制小型固体火箭开始，初步开启商业航天的服务模式，之后再实现向液体火箭的升级，开展中型、大型火箭以及可重复使用火箭的研发。过去几年已有多款民商固体运载火箭发射成功，解决了有无问题。国内民商液体火箭目前大部分处于研制阶段，预计未来几年将迎来集中首飞。

➤ **重点公司关注：**2023 年中国商业航天大爆发，前三季度全国民营火箭共发射 10 次，成功 9 次，创下了中国商业航天发展八年来的新记录，中国商业航天产业正迈入高速发展期，火箭制造的上游将率先受益，我们推荐航天连接器龙头航天电器、航天电子设备配套龙头航天电子、碳纤维预浸料龙头中航高科、T/R 组件龙头国博电子以及特种电源巨头新雷能。

风险提示：火箭研制进度不及预期；可靠性不足；星座建设进度不及预期；下游卫星应用市场拓展不及预期。

目录

1. 全球商业航天产业介绍.....	6
2. 火箭发动机发展.....	9
2.1 固体火箭.....	10
2.2 液体火箭.....	11
2.2.1 液氧/液氢火箭发动机.....	16
2.2.2 液氧/煤油火箭发动机.....	18
2.2.3 液氧/甲烷火箭发动机.....	21
3. 美国 spaceX 发展历程.....	26
4. 国内商业火箭企业发展.....	47
5. 投资建议.....	51
5.1 航天电器.....	51
5.2 航天电子.....	51
5.3 中航高科.....	52
5.4 国博电子.....	52
5.5 新雷能.....	52
6. 风险提示.....	54

图表目录

图 1： 商业航天产业链.....	6
图 2： 2023 年全球航天产业收入构成.....	6
图 3： 2023Q1 和 Q2 全球火箭发射次数.....	7
图 4： 2023Q1 和 Q2 全球航天器发射总质量（kg）.....	7
图 5： 长征一号火箭结构示意图.....	8

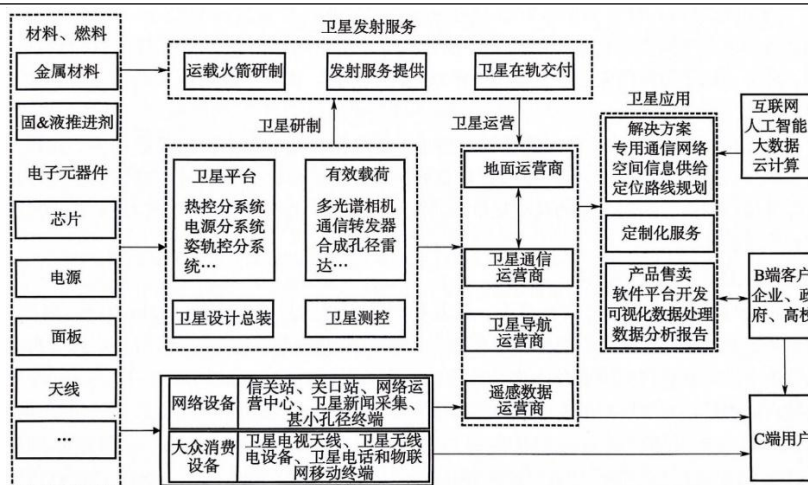
图 6: 液体火箭和固体火箭对比.....	9
图 7: 固体火箭结构图.....	10
图 8: 液体火箭发动机分类.....	11
图 9: “猛禽”（Raptor）发动机系统构成.....	12
图 10: 挤压式（左）和泵压式（右）供应系统示意图.....	14
图 11: RL-10（世界第一台氢氧发动机）	16
图 12: 航天飞机发射配置（采用 SSME 氢氧发动机）	16
图 13: 我国氢氧发动机.....	18
图 14: 苏联 RD-170（推力最强的多燃烧室发动机）	19
图 15: 美国 F-1（推力最强的单燃烧室发动机）	19
图 16: 国内液氧煤油发动机外形图.....	21
图 17: 猛禽 1 型（左）与 2 型（右）对比图.....	23
图 18: BE-4 液氧甲烷发动机.....	24
图 19: 蓝箭航天 TQ-12 液氧甲烷发动机.....	25
图 20: 星际荣耀 JD-1 液氧甲烷发动机.....	25
图 21: 星际荣耀 JD-2 液氧甲烷发动机.....	25
图 22: “猎鹰”系列运载火箭.....	26
图 23: “猎鹰”9 及“猎鹰”重型成功发射统计（截止 2023 年 10 月 10 日）	26
图 24: “星舰”飞船级（左）和“超重”火箭级（右）	27
图 25: 卫星发射成本.....	28
图 26: Starlink 星座与 OneWeb 星座对比.....	43
图 27: “猎鹰”-9 一子级海上回收轨迹图.....	45
图 28: “超重- 星舰”在发射捕获塔旁（左）和发射捕获塔结构（右）	46

表 1: 液体火箭发动机和固体火箭发动机对比.....	10
表 2: 不同推进剂的物理性质.....	13
表 3: 不同推进剂组合发动机理论比冲对比.....	13
表 4: 不同循环方式的原理和结构示意图.....	14
表 5: 不同循环方式的适用范围及优缺点.....	15
表 6: 国外氢氧发动机工作参数与发展历程.....	17
表 7: 国内外典型液氧/煤油发动机参数对比.....	20
表 8: 液氧/甲烷和液氧/煤油特性对比.....	21
表 9: 不同型号“猛禽”发动机的参数指标.....	23
表 10: “猎鹰”-9 火箭复用情况（截止 2023 年 10 月 10 日）.....	28
表 11: SpaceX 公司发射任务统计表（截止 2023 年 10 月 10 日）.....	29
表 12: SpaceX 火箭低成本的原因分析.....	43
表 13: “猎鹰”-9 子一级重复使用突破的三大关键技术.....	46
表 14: 国内主要商业火箭公司（不完全列表）.....	47
表 15: 国内主要商业火箭公司液体发动机研制进度（不完全列表）.....	48
表 16: 国内民营火箭公司发射统计表.....	48
表 17: 重点覆盖公司盈利预测及估值.....	53

1. 全球商业航天产业介绍

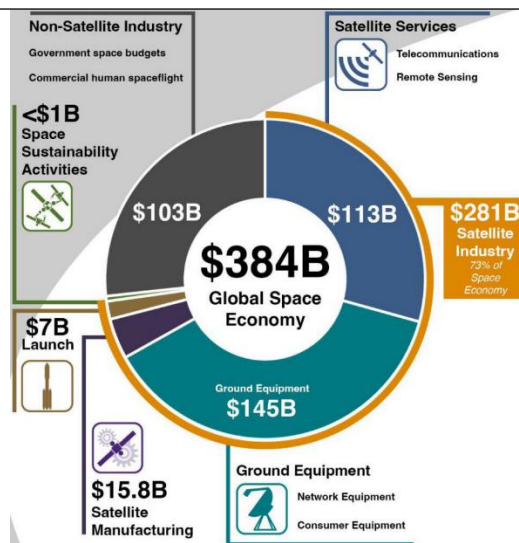
商业航天产业链总体分为四个环节：（1）电子元器件、材料及燃料厂商；（2）卫星研制商、发射服务提供商和地面设备制造商；（3）卫星运营商与卫星应用服务提供商（国内卫星运营商主要是中国卫星网络集团有限公司）；（4）终端用户（政府、企事业单位、个人）。根据美国卫星产业协会（SIA）的统计数据，2022 年全球航天产业的总收入是 3840 亿美元，其中非卫星产业总收入为 1030 亿美元，主要包括载人航天飞行收入、非地球轨道航天器收入和政府预算，卫星产业总收入为 2810 亿美元，占全球航天产业收入的 73%，主要包括了卫星制造业收入、发射服务业收入（约 70 亿美元）、卫星服务业收入和地面设备制造业收入等。

图 1：商业航天产业链



资料来源：《商业航天工程导论》、山西证券研究所

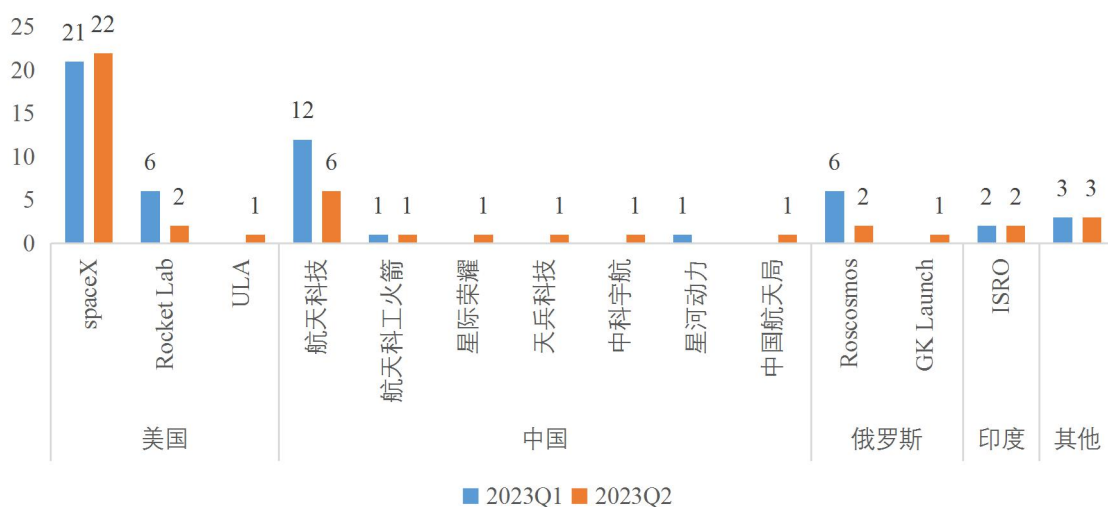
图 2：2023 年全球航天产业收入构成



资料来源：《The 2023 State of the Satellite Industry Report》、山西证券研究所

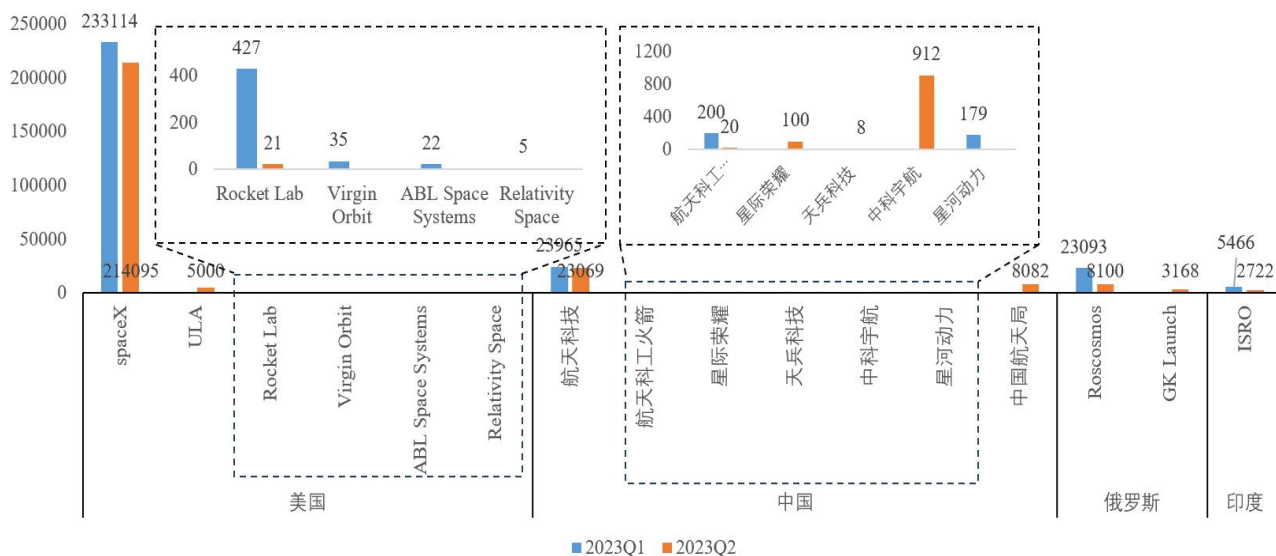
运载是进入空间的入口，目前我国火箭运力严重不足。虽然发射服务产值仅占整个航天产业的 1.5%~2%，但是运载是进入空间的入口，是连接卫星制造及卫星应用的中枢环节，随着国内外纷纷推出多个小型、中型、大型和巨型星座计划，卫星发射需求不断增长，但是火箭发射成本居高不下，成为制约星座大规模部署的主要瓶颈。对比 spaceX 的运载能力，我国现役运载火箭运载能力偏低，急需大力发展中大型可重复使用液体运载火箭，来满足星座大规模部署所需的“低成本、高可靠、高频次”发射能力。

图 3：2023Q1 和 Q2 全球火箭发射次数



资料来源：BryceTech、山西证券研究所

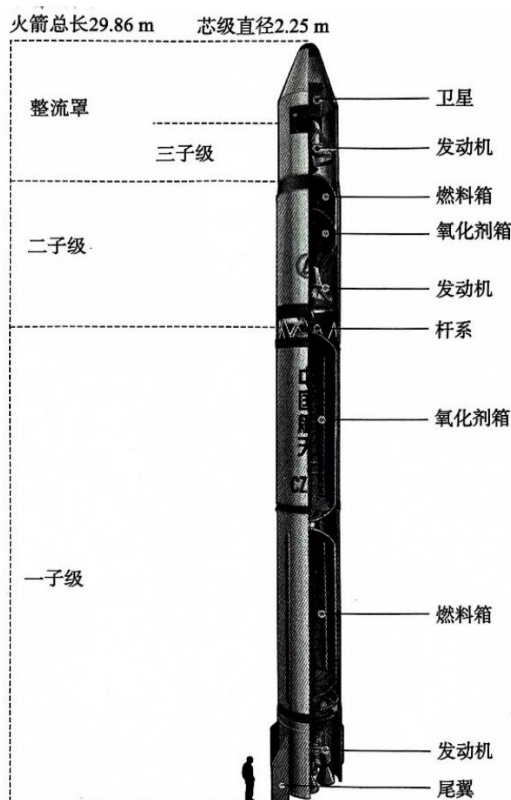
图 4：2023Q1 和 Q2 全球航天器发射总质量 (kg)



资料来源：BryceTech、山西证券研究所

运载火箭主要由结构系统（箭体结构）、动力装置系统（推进系统）以及控制系统等三个系统组成，这三个系统称为运载火箭的主系统。运载火箭一般由 2~4 级火箭组成，每一级火箭都包括箭体结构、推进系统和飞行控制系统，末级有仪器舱，可装载人造卫星和飞船，外面套有整流罩。如果火箭发射的有效载荷较大，可以在一枚火箭外面捆绑几枚小火箭，称为捆绑式火箭，中间的大火箭称为芯级火箭，外围捆绑的火箭称为助推火箭。

图 5：长征一号火箭结构示意图



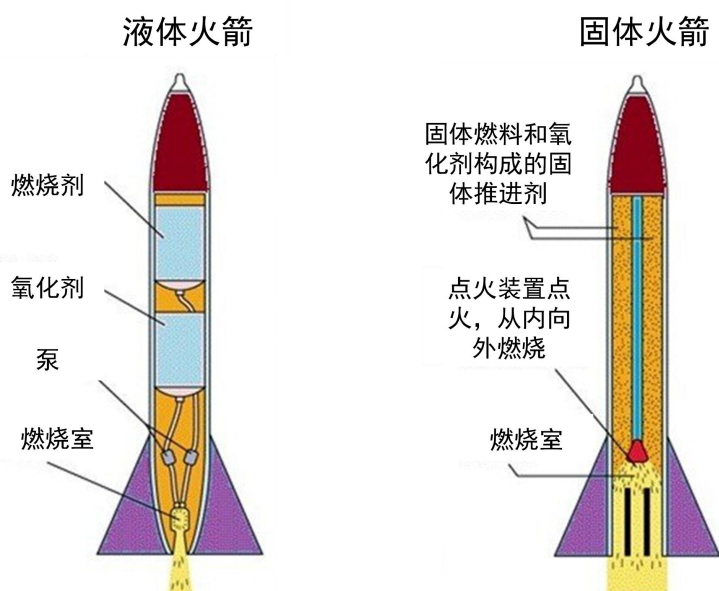
资料来源：《商业航天工程导论》、山西证券研究所

2. 火箭发动机发展

发展航天，动力先行。航天发展的瓶颈在火箭，火箭研发的瓶颈在发动机。火箭最核心的动力系统直接决定了火箭推力与运载能力，占全箭成本的 70%到 80%，对于运载火箭的系统复杂度、任务适应性、产品成本等均有较大影响。最早的运载火箭出现于第二次世界大战的德国，V-2 导弹是最典型代表，发动机是采用了以液氧/酒精作为推进剂的液体火箭发动机。目前液体和固体火箭发动机是火箭发动机中最基本、应用最广泛的两种发动机，其中固体火箭具有系统简单、发射准备周期短、发射点选择灵活等特点，在快速组网和补网等方面具有独特优势，但是固体火箭发动机一经点燃，就按照预定的推力方案工作，可控性差，难以实现可回收重复利用，而且固体火箭涉及的贮运安全和生产资质等问题难以解决，也制约了固体火箭成本的进一步下降，所以近年来，能够实现重复使用从而大幅降低运载成本的液体火箭优势突显，成为商业火箭公司竞争的焦点。

从效率方面评价火箭发动机的设计质量常常用到比冲的概念。比冲是消耗单位质量的推进剂所产生的推力冲量，是火箭发动机的主要性能参数之一。比冲越大，火箭可以达到的最大速度也越大，射程也越远。固体推进剂的比冲一般都低于液体推进剂。

图 6：液体火箭和固体火箭对比



资料来源：大英百科、山西证券研究所

表 1：液体火箭发动机和固体火箭发动机对比

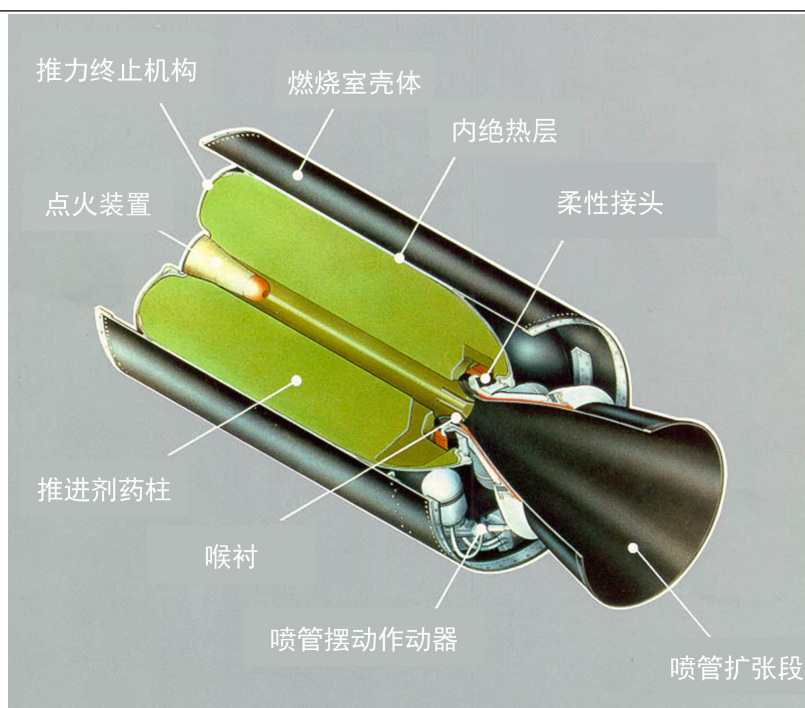
项目	液体火箭发动机	固体火箭发动机
比冲 (m/s)	2500~4600	2000~3000
结构	零部件数量多，结构复杂	不需要专用的推进剂贮箱和输运调节系统，结构简单
可控性	发动机的启动、关机和推力大小调节可以通过控制活门来实现，可以多次启动和脉冲工作，可控性好	一经点燃，就按照预定的推力方案工作，直至燃烧结束，很难根据临时需要调节推力大小，可控性差
使用性	液体推进剂一般消耗量大且不易在贮箱中长期贮存，需要发射前临时加注推进剂，发射准备工作时间长	可直接装填在发动机内长期存放，随时处于战备待发状态，维护使用更方便
工作时间	工作时间较长	工作时间不宜过长
质量比	液体推进剂密度较低，贮箱容积较大，导致运载器体积偏大	固体推进剂密度较大，可使固体火箭发动机的体积缩小，又由于壳体黏结技术和高强度材料的应用，使得发动机的壳体质量大为减少，提高了发动机的质量比
可靠性	相对偏低	较高

资料来源：《火箭发动机理论基础》、山西证券研究所

2.1 固体火箭

固体火箭发动机是指使用固体推进剂的化学火箭发动机。固体火箭发动机由药柱、燃烧室、喷管组件和点火装置等组成。固体推进剂点燃后在燃烧室燃烧，产生高温高压的燃烧产物，燃烧产物流经喷管膨胀加速，以高速从喷管排出从而产生推力。

图 7：固体火箭结构图



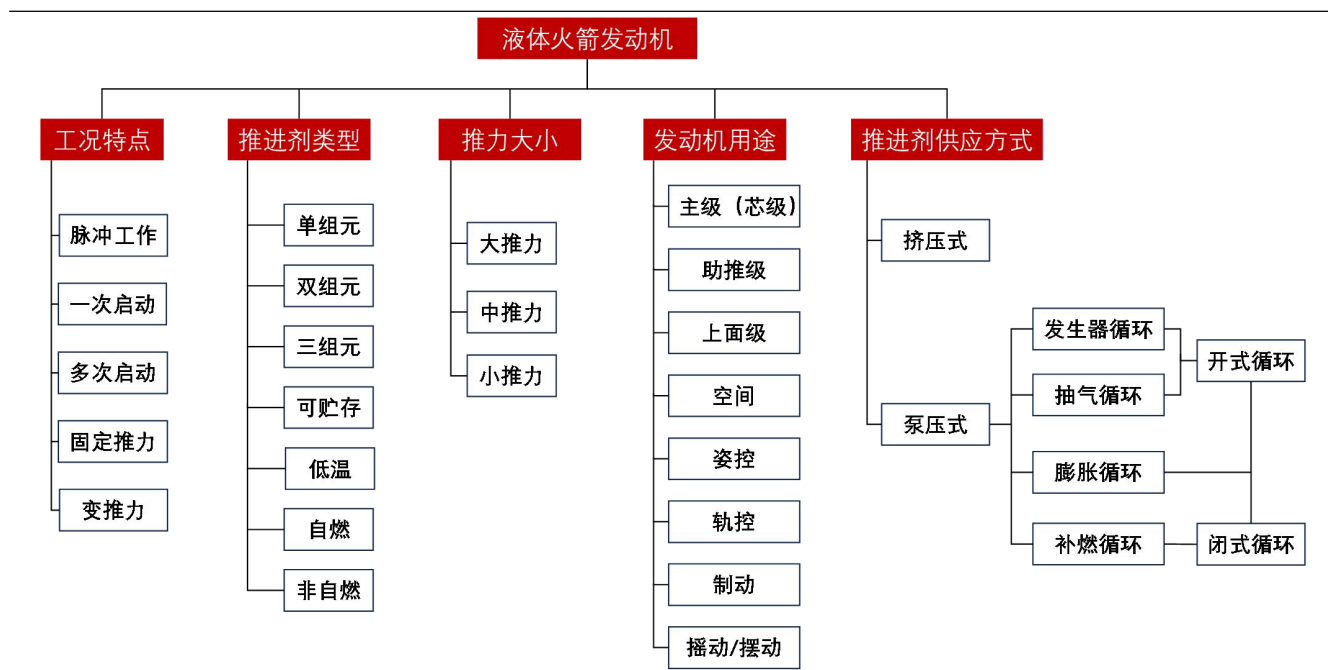
资料来源：《固体火箭发动机设计技术基础》、山西证券研究所

固体火箭发动机凭借其结构简单、可靠性高、便于机动部署、快速响应、维护使用方便等诸多优点，现已成为战略/战术导弹武器的主要动力装置，同时，固体火箭发动机是航天运载火箭系统的重要动力源，国外大型或重型捆绑式运载火箭多将其作为首选助推动力。由于固体火箭推进剂比冲较低，固体火箭一般需要采用多级构型才能实现入轨，但是多级构型会影响到火箭整体的复杂性、可靠性以及成本问题。虽然固体火箭发动机在起步阶段研发和制造成本低，固体火箭也是很多民营运载火箭公司进入商业发射服务领域的敲门砖，但当需要大推力火箭来发射更重的载荷时，固体火箭发动机的技术难度和成本就会爆发式增长。目前，固体火箭主要用于执行近地轨道或太阳同步轨道任务，更适合于追求快速发射的小卫星需求。

2.2 液体火箭

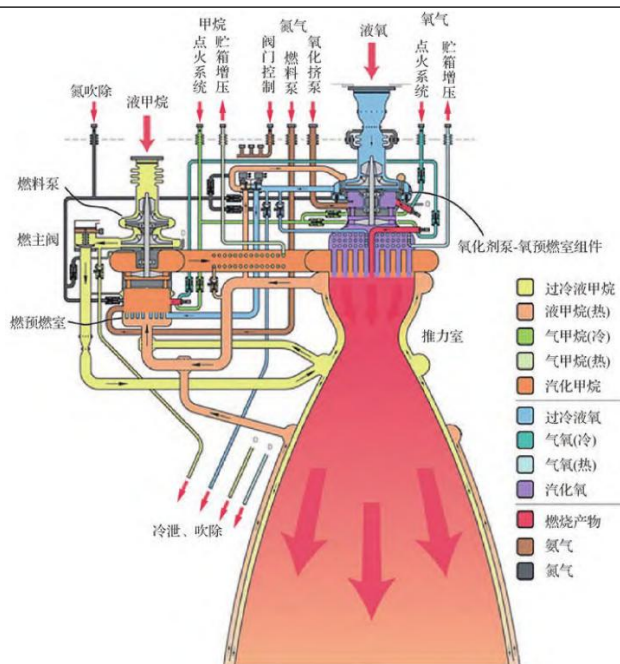
液体火箭发动机是目前运载火箭主级或上面级的主要动力。随着导弹和航天事业的迅猛发展，液体火箭发动机的应用范围和种类越来越多，可按工况特点、推进剂类型、推进剂供应方式和用途等分类。各种不同类型的液体火箭发动机虽然结构有一定差别，但是基本组成都有推力室、推进剂贮箱、推进剂供应系统、涡轮工质供应系统、增压系统和自动器等几部分。

图 8：液体火箭发动机分类



资料来源：《航天推进理论基础》、山西证券研究所

图 9：“猛禽”（Raptor）发动机系统构成



资料来源：《美国 SpaceX 超重-星舰首飞分析及对中国航天产业的启示》、山西证券研究所

液体火箭发动机动力路线的选择主要从三方面考虑，即推进剂类型、推进剂供应方式与泵压式系统的循环方式。目前，大多数液体火箭发动机使用双组元推进剂，典型的双组元推进剂组合主要包括四氧化二氮/偏二甲肼、液氧/液氢、液氧/煤油和液氧/甲烷。四氧化二氮/偏二甲肼属于常温推进剂，稳定性好，对冲击振动均不敏感，能够长时间贮存，加注过程简单，可以缩短发射准备时间，但是偏二甲肼是剧毒燃料，四氧化二氮/偏二甲肼燃烧会产生橘红色有害烟雾，严重污染环境。液氧/液氢比冲最高，性能优异，是无毒、绿色环保推进剂组合，但是密度比冲最低，需要体积较大的燃料贮箱，导致飞行器体积很大，另外由于液氢的温度极低，贮箱和管路必须很好地隔热，以尽量减少液氢的蒸发，以及湿气和空气在贮箱外壁的凝结，引入推进剂之前，必须吹除所有管道和贮箱中的空气，不然固态空气与液氢混合易发生爆炸，并且固态空气也容易堵塞管道和阀门，这使得系统结构和发射工序都更为复杂，成本较高。液氧/煤油和液氧/甲烷同为无毒、绿色环保推进剂组合，由于甲烷比热容高、结焦温度高、黏度小，是较为理想的冷却剂，可以更好地满足重复使用推力室冷却的要求，另外煤油在富燃燃烧时存在比较严重的积碳问题，将导致涡轮堵塞影响发动机推力，而甲烷在富燃燃烧时积碳极少，基本上没有影响，甲烷的以上优势降低了重复使用的维护成本，此外甲烷沸点与液氧相近，推进剂贮箱可以采用共底贮箱结构形式，从而提升了结构效率，考虑到未来月球和火星探测的需求，

甲烷是最适合就地取材制取的。迄今为止，俄罗斯的 RD-170 系列代表了液氧/煤油发动机技术的最高水平，美国的 SSME 代表了液氧/液氢发动机技术的最高水平，美国蓝色起源公司的 BE-4 与 SpaceX 公司的 Raptor 代表了液氧/甲烷发动机技术的最高水平。

表 2：不同推进剂的物理性质

物理性质	四氧化二氮	偏二甲肼	液氧	煤油	甲烷	液氢
沸点/°C	21.5	63.10	-182.99	145.00~274.00	-161.60	-252.89
密度/(10 ³ kg/m ³)	1.446 (20°C)	0.791 (20°C)	1.140 (沸点)	0.833 (20°C)	0.424 (沸点)	0.071 (沸点)
比热容/[J/(kg•K)]	1515.62 (20°C)	2733.98 (20°C)	1699.89 (沸点)	1967.80 (20°C)	3496.00 (沸点)	2386.48 (沸点)
黏度/(10 ⁻⁶ Pa•s)	418.9 (20°C)	527.0 (20°C)	196.0 (沸点)	1964.0 (20°C)	127.0 (沸点)	14.0 (沸点)
结焦温度/°C	——	——	——	589	978	——
富燃燃烧积碳量	——	——	——	严重	微量	——

资料来源：《液体火箭发动机结构动力学理论及工程应用》、山西证券研究所

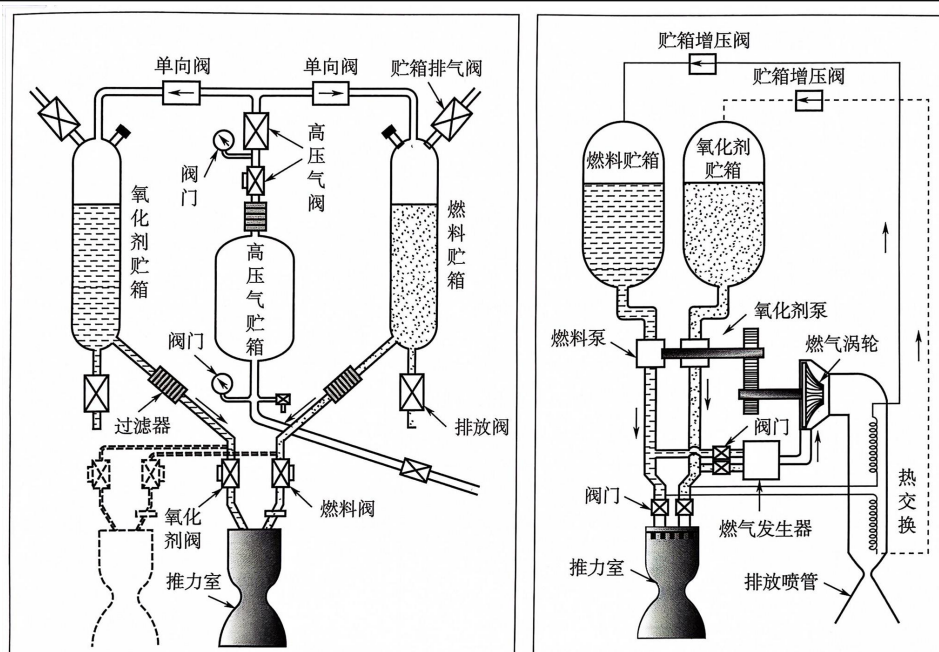
表 3：不同推进剂组合发动机理论比冲对比

参数	四氧化二氮/偏二甲肼	液氧/煤油	液氧/甲烷	液氧/液氢
混合比	2.24	2.74	3.50	6.00
喷管面积比	19.30	20.00	19.97	60.00
理论真空比冲/s	323.04	343.22	354.84	444.85
相对密度	1.173	1.024	0.827	0.361
理论密度比冲/s	378.90	351.48	293.68	160.65

资料来源：《液体火箭发动机结构动力学理论及工程应用》、山西证券研究所

液体火箭发动机按推进剂供应方式分为泵压式发动机和挤压式发动机。挤压式供应系统利用高压气体将贮箱中的液体推进剂挤压输送到发动机的推力室，是最简单的推进剂供应方式，通常用在推进剂量和总冲量较小且比冲要求不高的发动机上。泵压式供应系统通常采用燃气驱动的涡轮泵作为主要增压装置，可以使推进剂组元在泵出口获得很高的压力，有效减少贮箱和增压系统的结构质量，并且获得很高的燃烧压力，提高发动机比冲，通常应用在推进剂流量大、推力大、性能高的场合，如运载火箭和战略导弹的主动力、上面级主推进系统等，系统较复杂。

图 10：挤压式（左）和泵压式（右）供应系统示意图

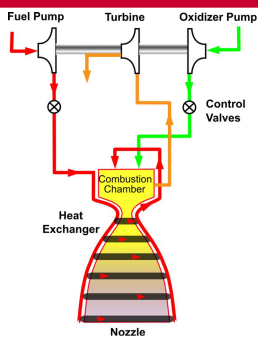
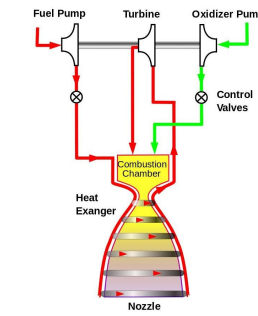
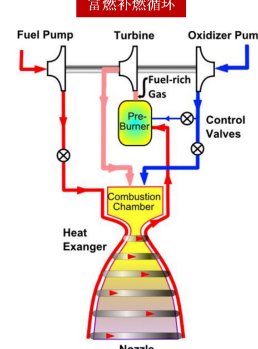
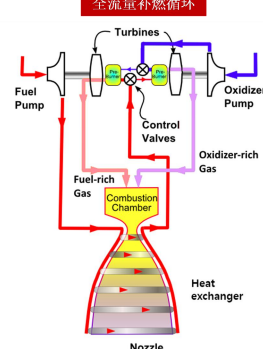


资料来源：《液体火箭发动机结构动力学理论及工程应用》、山西证券研究所

泵压式系统的循环方式按照涡轮工质的来源可以分为燃气发生器循、补燃循环（又称分级燃烧循环）、膨胀循环及抽气循环，其中补燃循环又分为富氧补燃循环、富燃补燃循环和全流量补燃循环。按照涡轮工质的排放方式又可分为开式循环和闭式循环，其中燃气发生器循环和抽气循环属于开式循环，补燃循环和膨胀循环属于闭式循环。各类循环方式的主要区别在于性能和结构复杂度，性能包括比冲、推力和推重比，它决定了飞行器的运载能力，结构复杂度包括组件数目和技术成熟度，决定了研制经费、生产周期和成本以及产品可靠性。综合比较，补燃循环技术先进，无比冲损失，发动机性能更高，可以有效降低航天运载器的发射成本，代表着液体火箭发动机的发展方向。

表 4：不同循环方式的原理和结构示意图

循环方式	原理	结构示意图
燃气发生器循环	部分燃料与部分氧化剂进入燃气发生器进行燃烧，利用产生的富燃燃气驱动涡轮，做功后的废气直接排出，不再参与燃烧	

循环方式	原理	结构示意图
抽气循环	从燃烧室喷注面附近引出燃气，用以驱动涡轮，做功后的燃气直接排出，不再参与燃烧省去了燃气发生器系统	
膨胀循环	驱动涡轮的气体是经过推力室冷却通道后高压气化的推进剂	
补燃循环	发生器产生的富氧（富燃）燃气驱动涡轮后会注入推力室与剩余的燃料或者氧化剂继续燃烧	富燃补燃循环  全流量补燃循环 

资料来源：《液体火箭发动机结构动力学理论及工程应用》、维基百科、山西证券研究所

表 5：不同循环方式的适用范围及优缺点

类别	燃气发生器	抽气循环	膨胀循环	补燃循环
推进剂	推进剂种类不受限制，发生器和推力室可以使用不同的推进剂	推进剂种类不受限制	主推进剂的一种组元必须容易气化，且分子量小	推进剂种类不限
推力和室压	推力不受限，室压高时比冲损失大，室压上限不高	推力不受限，室压上限不高	适用于较低的推力和室压	推力不受限，适用于高室压
比冲	低	低	较高	高
优点	结构较简单，有研制经验，推力和混合比的调节容易，可在较大的推力范围内使用，结构质量小	结构简单且结构质量小	比冲高，结构简单，涡轮工质清洁	比冲高，极限室压高
缺点	比冲低，燃烧室压强高时比	推力室的设计复杂，抽出	燃烧室压强高时不适用，	结构复杂，质量大，性能

类别	燃气发生器	抽气循环	膨胀循环	补燃循环
	冲损失大	的燃气需要降温和调节， 比冲低	启动加速性慢	参数调节和校准困难

资料来源：《航天推进理论基础》、《液体火箭发动机结构动力学理论及工程应用》、山西证券研究所

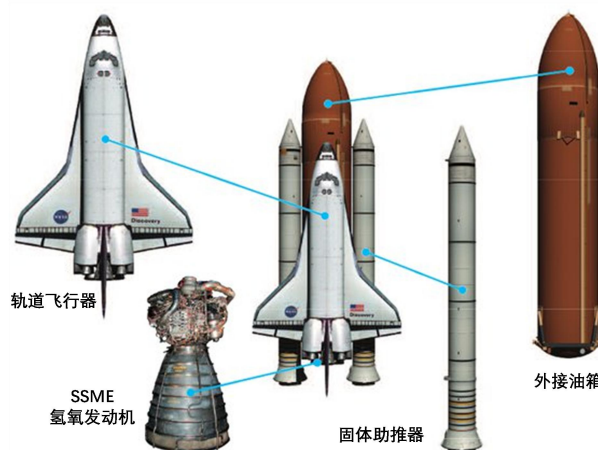
2.2.1 液氧/液氢火箭发动机

在火箭发动机领域，氢氧液体火箭发动机具有最高的比冲性能，燃烧产物是水，环保无污染，另外液氢具有良好的冷却性能，使用液氢作冷却剂的推力室可以重复使用，冷却通道内也非常干净，所以不论在一次性使用运载火箭还是未来可重复使用运载器中，氢氧液体火箭发动机都占有重要地位。但是液氢在使用上仍有不少缺陷，首先液氢温度极低，需要隔热建立超低温的环境，其次氢分子量小，黏度低，很容易泄露，混合空气后易爆炸，需要认真解决低温密封问题，最后是液氢的密度很小，需要体积较大的燃料贮箱，导致飞行器体积很大。由于研制氢氧火箭发动机需要克服上面这些缺点，研制难度较大，加之液氢成本高昂，因此液氧液氢火箭发动机不适应低成本发射需求的商业运载火箭。

图 11：RL-10（世界第一台氢氧发动机）



图 12：航天飞机发射配置(采用 SSME 氢氧发动机)



资料来源：Aircraft Engine Historical Society、山西
证券研究所

资料来源：Quora、山西证券研究所

1958 年美国开始研制世界第一台氢氧发动机 RL-10，纵观半个多世纪的发展历程，氢氧发动机发展大致分为 3 个阶段。第一个阶段是起步发展时期（20 世纪 50 年末到 70 年代初），发动机推力不大，推力级多为 10t 左右，各种循环方式全面发展，主要用于运载火箭上面级，代表型号有美国 RL-10 和 J-2、苏联的 RD-56、欧洲的 HM-7 和日本的 LE-5，各国通过小推力氢

氧发动机的研制，基本掌握了氢氧发动机的设计、生产和试验技术，为大推力的氢氧发动机研制奠定了基础。第二阶段是高速发展时期（20 世纪 70 年代中期至 80 年代末），这一阶段关注于实现更大的推力和更高的性能，发动机循环方案以补燃循环为主，代表型号有美国的 SSME、苏联的 RD-0120、欧洲的 Vulcain 和日本的 LE-7，推力量级为 100t~200t，其中美国的 SSME 发动机还提出了多次重复使用的目标，迄今为止代表了液氧/液氢发动机技术的最高水平。第三阶段是全面发展时期（20 世纪 90 年代至今），这一阶段各种推力量级和各种循环方式均全面发展，在追求性能的同时，也更加注重可靠性和研制成本，例如日本在 LE-7 基础上发展了简化设计的 LE-7A，美国在拥有 SSME 之后，发展了低性能低成本的 RS-68，Vulcain、RL-10、J-2 则通过不断优化提升性能和可靠性。此外，闭式膨胀循环开式向 20t 推力量级发展，日本独辟蹊径发展了开式膨胀循环氢氧发动机。

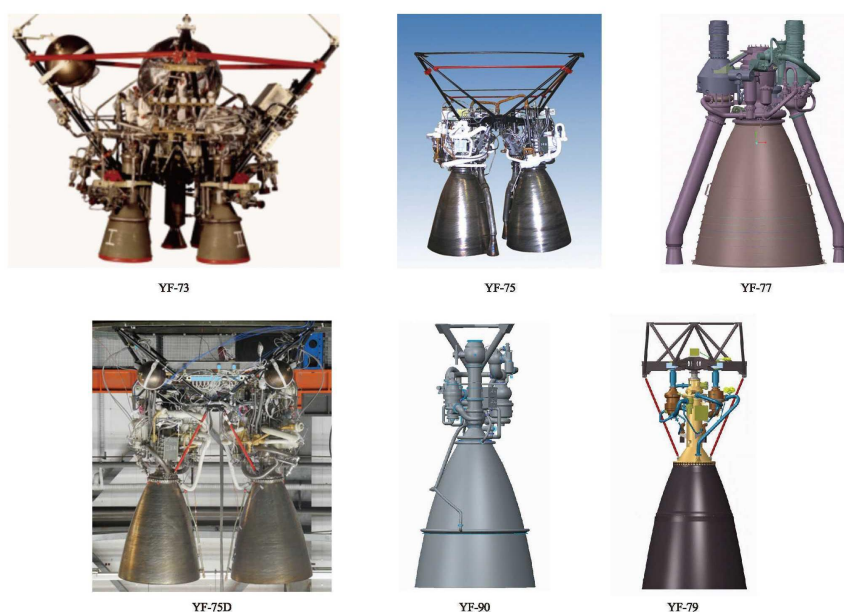
表 6：国外氢氧发动机工作参数与发展历程

代号	国别	年代	循环方式	推力/t	比冲/s	应用
RL-10	美国	1958	闭式膨胀	6.8	444	土星 I 二级
RD-56	苏联	1960	补燃	7	462	N1 火箭上面级
D-57	苏联	1960	补燃	40	456	N1 火箭三级
J-2	美国	1960	发生器	104	426	土星 V 二三级
HM-7	欧洲	1973	发生器	6.3	443	阿里安上面级
LE-5	日本	1974	发生器	10.5	449	H I 二级
SSME/RS-25	美国	1978	补燃	209	452	航太飞机/SLS 一级
RD-0120	苏联	1983	补燃	186	454	能源号芯级
LE-7	日本	1984	补燃	110	446	H II 一级
Vulcain	欧洲	1985	发生器	116	431	阿里安 V 一级
LE-7A	日本	1989	补燃	110	440	H II A 一级
LE-7B	日本	~1990	开式膨胀	13.7	447	H II A 二级
RL10-A/B/C	美国	~1990	闭式膨胀	~11	~467	多型火箭上面级
Vulcain2	欧洲	1996	发生器	138	434	阿里安 V 一级
RS-68	美国	1997	发生器	334	209	德尔它 IV 芯级
CE7.5/RD-56M	印度	1998	补燃	7	454	GSLV 上面级
J-2X	美国	~2000	发生器	130	448	SLS 二级
RD-0146	俄罗斯	~2002	闭式膨胀	10	460	——
Vinci	欧洲	~2010	闭式膨胀	18	466	阿里安 VI 上面级
CE20	印度	2010	发生器	20	443	GSLV-III 上面级
LE-9	日本	2015	开式膨胀	140	425	H III 助推级
RL-60	美国	~2003	闭式膨胀	27	465	——

资料来源：《我国大推力氢氧发动机发展思考》、山西证券研究所

我国氢氧发动机研制始于 20 世纪 70 年代，曾先后成功研制出用于 CZ-3 系列运载火箭上面级 YF-73 和 YF-75，以及用于 CZ-5 芯一级的 50t 级 YF-77 和芯二级的 9t 级 YF-75D。相比国外先进氢氧发动机，国内氢氧发动机推力偏小，由于尚未掌握氢氧发动机补燃循环技术，以及在设计和材料工艺方面的差距，国内氢氧发动机比冲和推重比水平偏低。目前我国正在研制 220t 级氢氧发动机，采用高压补燃循环技术方案，设计参数达到世界先进水平，未来将作为重型火箭二级和三级的动力。大推力高压补燃循环氢氧发动机的研制将大幅提升我国氢氧火箭发动机的水平，带动我国氢氧发动机设计、制造工艺和试验技术水平的提高升级。

图 13：我国氢氧发动机



资料来源：《我国高性能液氧液氢发动机技术发展概述》、山西证券研究所

2.2.2 液氧/煤油火箭发动机

液氧/煤油是无毒、绿色环保推进剂组合，燃烧产物是水蒸气和二氧化碳，是综合性能优秀的推进剂。煤油作为常温推进剂，贮存性能好，液氧煤油推进剂组合密度比冲高，使得火箭贮箱尺寸小、成本低。液氧煤油发动机作为运载火箭主动力装置，是大规模、低成本进出空间的优选动力装置，在国家重大航天运载项目、商业航天运输系统和重复使用运载器领域占有重要位置。

图 14：苏联 RD-170（推力最强的多燃烧室发动机）



资料来源：维基百科、山西证券研究所

图 15：美国 F-1（推力最强的单燃烧室发动机）



资料来源：维基百科、山西证券研究所

20 世纪 50~60 年代，美国和苏联的航天运载主动力均以液氧煤油发动机为主。1957 年苏联成功研制了 80t 级的 RD-107/108 液氧煤油发动机，并以此动力成功将第一颗人造卫星和第一名字航员送入太空。60 年代苏联研制了 150t 级的 NK-33 液氧煤油发动机，用于载人登月的 N-1 火箭，美国的土星 V 重型运载火箭采用 680t 级的 F-1 液氧煤油发动机作为一级主动力，成功实现了载人登月。20 世纪 70~80 年代，主动力选择出现分歧。苏联致力于发展大推力液氧煤油高压补燃循环发动机技术并取得突出成就，针对能源号和天顶号运载火箭需求，成功研制了 740t 级推力的 RD-170 和 85t 级的 RD-120 液氧煤油发动机，RD-170 时至今日仍代表了液氧/煤油发动机技术的最高水平。由于技术和相关工业体系发展方向等原因，美国航天飞机、欧洲阿里安 5 火箭和日本 H-2A 火箭等运载火箭的主动力，转向采用大推力固体助推器加液氧液氢发动机的模式。20 世纪 90 年代以来，俄罗斯液氧煤油发动机技术达到世界最高水平。90 年代，俄罗斯在继承 RD-170 发动机的基础上，成功拓展研制了 400t 级推力的 RD-180 和 200t 级推力的 RD-191 液氧煤油发动机，其中 RD-180 发动机出口美国用于宇宙神系列运载火箭，另外还有 NK-33（用于美国阿塔瑞斯运载火箭）和 RD-120 也被引入美国。进入 21 世纪，美国民营宇航公司迅速发展，2005 年以来 SpaceX 公司研制了 Merlin-1 系列液氧煤油发动机，成为猎鹰 1/9 运载火箭成功和 SpaceX 公司崛起的关键。

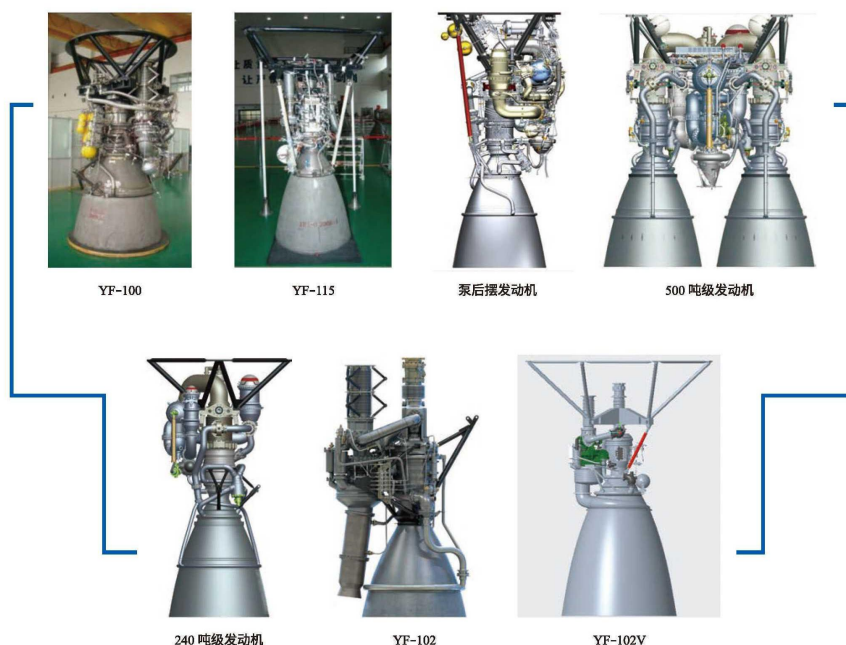
表 7：国内外典型液氧/煤油发动机参数对比

国家	名称/代号	海平面推力/kN	海平面比冲/（m/s）	循环方式	应用火箭
中国	YF-100	1200	2942	补燃	长征五号、六号、七号
	YF-115	180（真空）	3334（真空）	补燃	长征六号、七号
	泵后摆	1250	2958	补燃	新一代载人火箭
	泵后摆二级	1434（真空）	3393	补燃	新一代载人火箭
	500 吨级	4800	3021	补燃	重型运载火箭
	240 吨级	2400	3021	补燃	重型/大型/中型运载火箭
	YF-102	835	2700	发生器	商业运载火箭
	YF-102V	710（真空）	3255（真空）	发生器	商业运载火箭
苏联-俄罗斯	RD-107	819	2520	发生器	联盟
	NK-33	1510	2915	补燃	N1
	RD-120	834（真空）	3432（真空）	补燃	天顶 3SL
	RD-170	7257	3033	补燃	天顶/能源
	RD-180	3827	3059	补燃	宇宙神 5
	RD-191	1922	3051	补燃	安加拉
美国	F-1	6895	2550	发生器	土星 5
	RS-27	911	2579	发生器	德尔它
	Merlin-1D+	845	2827	发生器	猎鹰 9Block5
	Merlin-1DV	934（真空）	3410（真空）	发生器	猎鹰 9Block5

资料来源：《我国液氧煤油发动机技术发展概述》、山西证券研究所

20 世纪 80 年代起，我国开始研究液氧煤油发动机技术，经历三十余年发展我国已成为世界第二个完全掌握液氧煤油高压补燃循环发动机技术的国家，并形成了系列化、型谱化发展路线。目前我国正在研制 500t 级和 240t 级液氧煤油高压补燃循环发动机，未来可作为重型、中大型运载火箭主动力，这些发动机的研制将大幅提升我国航天动力的技术水平，助力载人登月、深空探测等重大航天任务实施，有力提升我国未来大规模进入空间、利用空间的能力。

图 16：国内液氧煤油发动机外形图



资料来源：《我国液氧煤油发动机技术发展概述》、山西证券研究所

2.2.3 液氧/甲烷火箭发动机

液氧甲烷发动机的概念早在 20 世纪 60 年代就已提出，但是航天大国苏联和美国的研究重点分别放在液氧煤油和液氧液氢发动机上，并没有给予足够重视。近年来随着可重复使用运载器动力需求的提出，液氧甲烷发动机由于具备无毒环保、高比冲、不易结焦积碳、易于重复使用、低成本等综合优势，受到商业航天公司的青睐，并涌现出一批不同成熟度的代表型号。

表 8：液氧/甲烷和液氧/煤油特性对比

项目	液氧/甲烷	液氧/煤油	备注
比冲 (s)	354.84	343.22	液氧甲烷比冲略高于液氧煤油，但是密度比冲不如液氧煤油，相同起飞质量的运载火箭，采用液氧煤油和液氧甲烷运载能力基本相同
密度比冲 (s)	293.68	351.48	
来源与成本	部分产地的液化天然气(甲烷含量在 95%以上，杂质主要为乙烷和丙烷，总硫含量在 1×10^{-6} 以下)可直接使用，价格约 6 元/kg	航天煤油来自石化产品，国内主要由克拉玛依炼油厂提供，价格约 15 元/kg（供给国有航天单位）	考虑到甲烷作为低温推进剂，在运输、贮存和加注过程中会有损耗，同时需要一定的安全费用，两者成本基本相当，对发射成本影响较小
冷却特性	比热高、黏度低、不易结焦，冷却性能优异	比热低、黏度大，易结焦	甲烷的综合冷却性能是煤油的 3 倍以上，更适合推力室冷却，液氧甲烷发

项目	液氧/甲烷	液氧/煤油	备注
			动机推力室具有较高的寿命裕度，能够达到长寿命、多次使用要求
燃烧稳定性	黏度低，容易雾化成极细小的液滴，从而有利于快速燃烧和持续燃烧的稳定性	黏度大，不易雾化为细小液滴，影响燃烧稳定性	对于需要深度调节推力大小的可重复使用运载火箭的发动机来说，燃烧稳定性是个至关重要的性能指标
飞行后处理	回收后液氧和甲烷均可快速蒸发，无需处理，24h 内可再次飞行	易结焦积碳，回收后还需要对发动机进行清洗作业，在一段时间后才能重新使用	使用维护性对运载火箭的发射成本和发射周期影响较大，液氧甲烷发动机具有快速、高效的飞行后处理措施，使用维护性更好
结构影响	1) 甲烷和液氧的沸点较为接近，可以方便地采用共底贮箱，有效缩短贮箱长度、减轻箭体重量，从而增加火箭的运载能力，降低发射成本； 2) 液氧和甲烷均为低温推进剂，火箭贮箱可以采用自生增压，有利于简化增压输送系统方案，降低成本	需要使用绝热共底贮箱，生产工艺更复杂；需要使用氦气瓶进行增压	——
深空探测	1) 甲烷和液氧温区接近，深空探测任务中可以用类似的甚至相同的系统来统一进行管理，适应长期贮存需求，热管理方面拥有优势； 2) 在火星和土卫六上，可以就地取材，存在生产提炼甲烷的可能	——	如果实现推进剂的就地制取，可以大幅降低火箭去程携带大量推进剂的负担，满足火箭返程的动力需求

资料来源：《蓝箭航天液氧甲烷发动机研制进展》、《液氧甲烷火箭发动机：太空探索的未来动力！》、《我国可重复使用液体火箭发动机发展的思考》、山西证券研究所

液氧甲烷发动机因为具有低成本、无毒无污染、不易结焦积碳、使用维护方便、适于重复使用、比冲较高等特点，更加适宜于重复使用、低成本运载器的使用要求，已成为下一代液体运载火箭的理想动力选择，世界主要航天强国都在积极开展液氧/甲烷发动机技术和火箭技术的研究。美国是最早对液氧/甲烷发动机进行研究的国家之一，目前走在液氧甲烷发动机研制与应用的前列，美国 SpaceX 和 Blue Origin 两家私有企业主导了大推力液氧/甲烷发动机(Raptor、BE-4)的研制工作。“猛禽”(Raptor)是美国太空探索技术公司(SpaceX)正在研发的液氧甲烷发动机系列，计划作为该公司“星舰”和“超重”助推器的主动力，是世界首款实用化的全流量补燃循环火箭发动机，该系列有“猛禽”1(Raptor 1)、“猛禽”2(Raptor 2)和“猛禽”

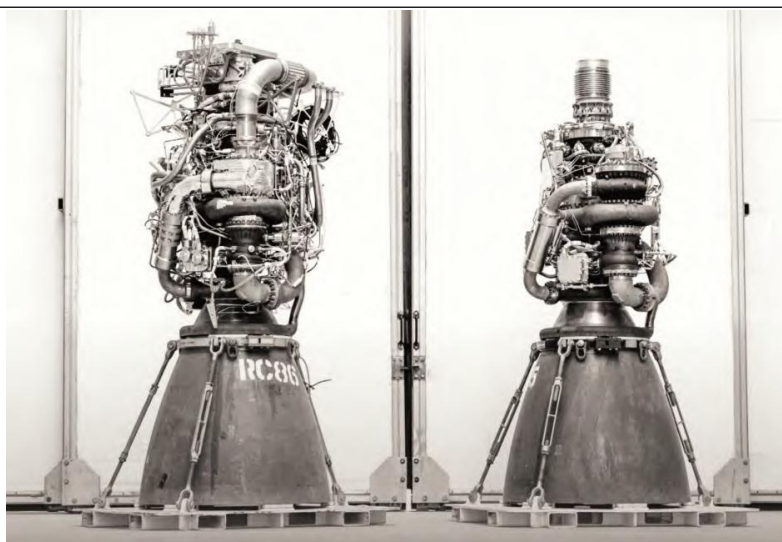
真空版（Raptor Vacuum）3 个版本。2021 年 5 月，“猛禽”1 首次完成全任务时长发动机试验，“猛禽”2 是“猛禽”1 的改进版，2022 年 3 月开始交付给进行轨道测试的“星舰”使用，目前“猛禽”2 仍在持续改进中。

表 9：不同型号“猛禽”发动机的参数指标

型号	“猛禽”1	“猛禽”2	“猛禽”真空版
混合比	3.6	3.55	3.6
室压/MPa	25	30（最高 33）	30
海平面推力/kN	1850	2300	——
海平面比冲/s	330	327	——
真空推力/N	——	——	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	Φ1.3mx3.1m	Φ1.3mx3.1m	Φ3.8mx5m
变推力	40%~100%	40%~100%	——
质量/kg	2000	1600	——

资料来源：《美国商业航天公司液氧甲烷发动机研制进展》、山西证券研究所

图 17：猛禽 1 型（左）与 2 型（右）对比图

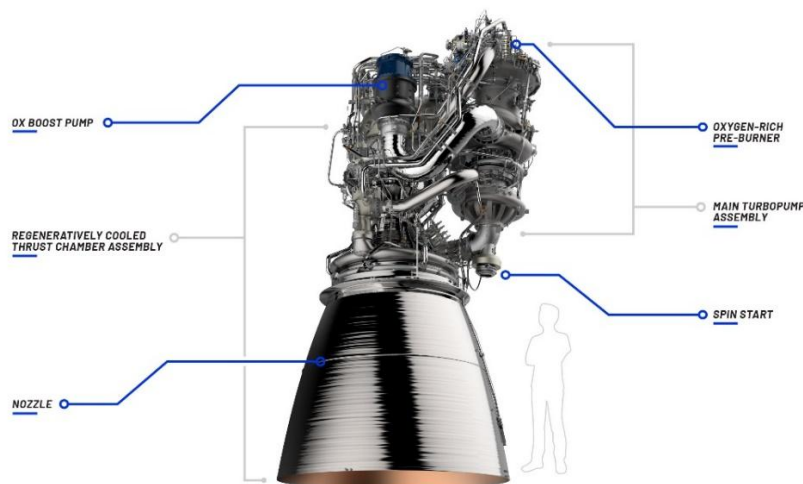


资料来源：《液氧甲烷为何成为火箭燃料“新宠”》、山西证券研究所

BE-4 发动机是蓝色起源公司（Blue Origin）正在研发的大推力液氧甲烷发动机，计划用于其自主开发的“新格伦”火箭和联合发射联盟的“火神-半人马”火箭上。BE-4 的设计推力高

达 2450kN，是全世界初始设计推力最高的液氧甲烷发动机，采用富氧补燃循环，设计燃烧室压 13.4MPa，海平面比冲 310s，同时具备 40%~100%变推力、100 次重复使用和 $\pm 5^\circ$ 摇摆能力。2020 年 5 月，BE-4 进行了全推力状态下的 8°摇摆试验，总试车时间累计达 2500s，2022 年 11 月，两台 BE-4 完成在“火神-半人马”火箭上安装，2023 年 1 月随火箭运抵发射塔架，目前正在准备进行全箭的安装和测试，但是 2023 年 6 月供“火神-半人马”火箭第二次发射任务使用的 BE-4 在测试中发生爆炸事故，交付时间或推迟。

图 18：BE-4 液氧甲烷发动机



资料来源：Blue Origin 官网、山西证券研究所

我国于 20 世纪 80 年代开展了液氧/甲烷发动机的预先研究工作，进入 21 世纪后，我国启动了液氧/甲烷发动机关键技术研究。通过“十一五”、“十二五”的研究，中国已经基本突破了重复使用液氧甲烷发动机关键技术，验证了 60 吨级液氧甲烷发动机重复使用性能，开展了 3 吨级和 8 吨级高性能上面级液氧甲烷发动机关键技术攻关，契合了世界重复使用火箭发动机的研究方向。国内商业航天公司方面，蓝箭航天、星际荣耀、九州云箭、宇航推进等公司近年来也纷纷发布了新型运载火箭计划并投入液氧甲烷发动机的研制。2019 年蓝箭航天 80 吨级液氧甲烷发动机“天鹊”12 号和星际荣耀 15 吨级液氧甲烷发动机“焦点”1 号全系统长程试车成功，紧随其后 2021 年九州云箭 80 吨级液氧甲烷发动机“龙云”和 10 吨级液氧甲烷发动机“凌云”完成全系统长程试车，2023 年 7 月 12 日，采用“天鹊”发动机的朱雀二号液氧甲烷火箭成功在酒泉卫星发射中心发射成功，成为世界上第一枚成功入轨的甲烷火箭。

图 19：蓝箭航天 TQ-12 液氧甲烷发动机



资料来源：蓝箭航天官方微博、山西证券研究所

图 20：星际荣耀 JD-1 液氧甲烷发动机



资料来源：星际荣耀官网、山西证券研究所

图 21：星际荣耀 JD-2 液氧甲烷发动机

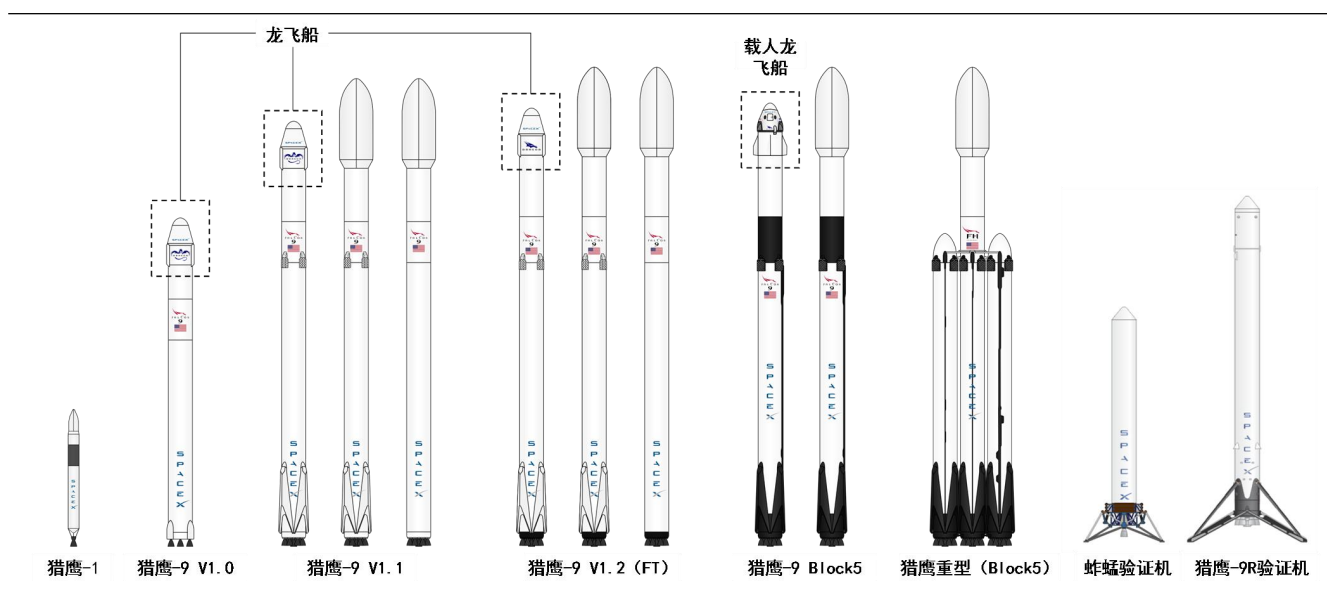


资料来源：星际荣耀官网、山西证券研究所

3. 美国 spaceX 发展历程

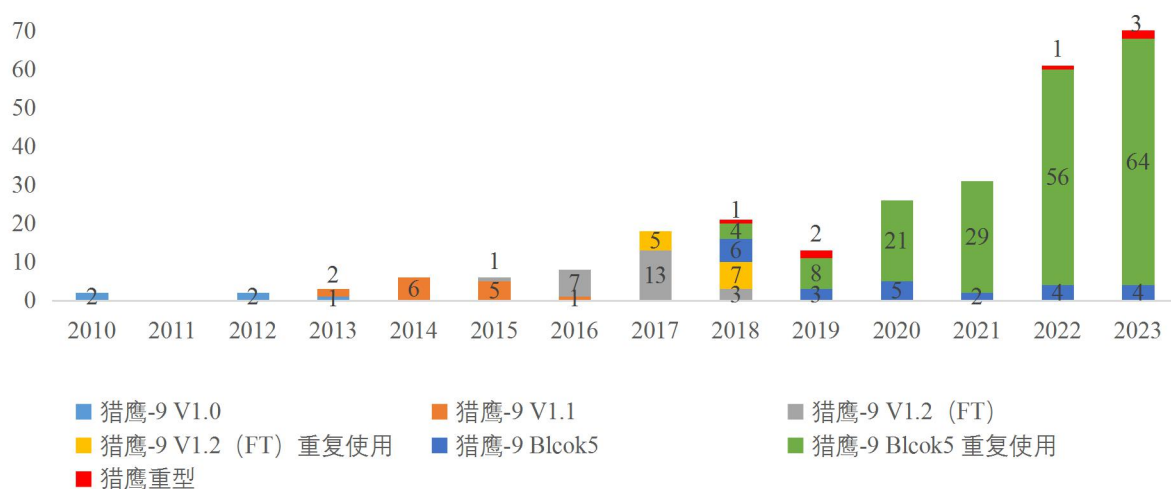
美国太空探索技术公司（SpaceX）由埃隆·马斯克（Elon Musk）于 2002 年创立，经过 20 年的发展，研制出了“猎鹰”（Falcon）系列运载火箭、“龙”（Dragon）飞船、“载人龙”（Crew Dragon）飞船、“星链”（Starlink）星座、“星舰”飞船和“超重”火箭等航天系统，业务覆盖大中小型卫星发射服务、货物与乘员运输、低轨宽带通信服务等领域，取得了多项突破，已经成为美国商业航天企业的先锋力量。

图 22：“猎鹰”系列运载火箭



资料来源：维基百科、Historic Spacecraft、山西证券研究所

图 23：“猎鹰”9 及“猎鹰”重型成功发射统计（截止 2023 年 10 月 10 日）



资料来源：维基百科、山西证券研究所

SpaceX 的发展大致可以分为三个阶段，第一阶段（2002~2009）是萌芽时期。SpaceX 从无到有，首枚火箭“猎鹰”-1 的研制历经坎坷，第一次发射比原计划推迟了 1 年，在经历了 2006~2008 年连续三次失败后，终于 2008 年 9 月取得成功，成为首次成功发射入轨的私人液体火箭，并于 2009 年 7 月连续第二次试射成功，同时首次将卫星送入低地球轨道。2008 年 12 月，SpaceX 公司赢得了 NASA 高达 16 亿美元的国际空间站商业货运合同，并计划采用猎鹰-9 和“龙”飞船在航天飞机退役后为国际空间站运送物资。第二阶段（2010~2017）是快速成长时期。为了满足 NASA 的空间站货运合同，SpaceX 叫停了“猎鹰”-5 的研发，直接冲刺运载能力更强的“猎鹰”-9 火箭。2010 年 6 月，“猎鹰”-9 首次飞行，2012 年“龙”飞船与国际空间站对接，成为历史上首次对接国际空间站的商业飞船。“猎鹰”-9 火箭于 2015 年和 2016 年相继实现火箭一子级陆地和海上平台回收，并于 2017 年实现一子级的重复使用，重新定义了运载火箭，并形成大规模、快速、低成本进入空间能力。第三阶段（2018 年至今）是发展壮大时期。“猎鹰”-9 火箭从首飞开始就进行了大量设计上的持续改进，在经历了 8 年的迭代升级后，终极版“猎鹰”-9（“猎鹰”-9 Block5）定型。2018 年猎鹰重型火箭首飞成功，成为现役推力最大的运载火箭（近地轨道运载能力 63.8 t）。2020 年 SpaceX 顺利发射载人“龙”飞船，这是航天飞机退役后时隔近 9 年美国再次自主将本国航天员送入轨道，载人“龙”飞船认证完成最后一个重要里程碑。2021 年星舰原型机 SN15 成功实现 10 km 高度飞行演示验证，2023 年 4 月“超重-星舰”执行首次轨道级测试飞行任务，但升空后不久发生爆炸，“超重-星舰”未来将具备全箭可完全重复使用能力。

图 24：“星舰”飞船级（左）和“超重”火箭级（右）



资料来源：《SpaceX “超重-星舰”运输系统研制进展》、山西证券研究所

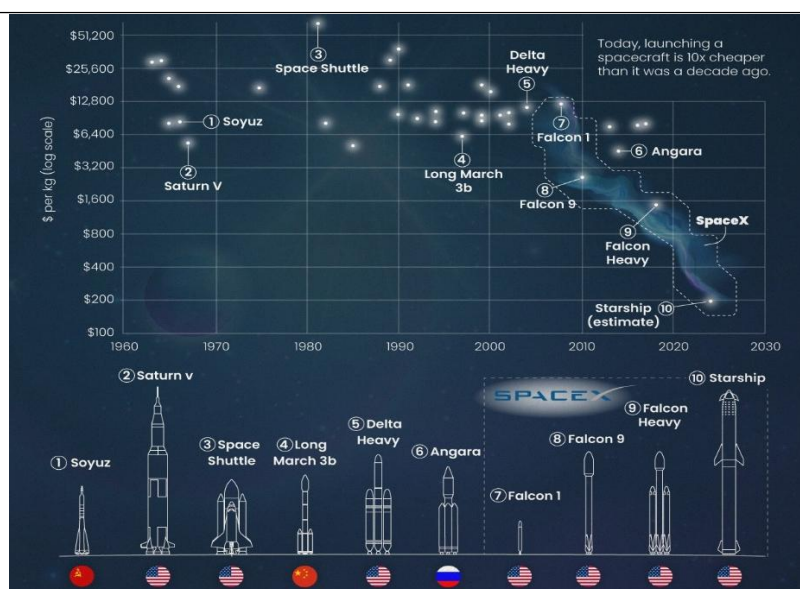
SpaceX 公司用了 16 年时间，先后研制成功“猎鹰”-1、“猎鹰”-9 和“猎鹰”重型系列运载火箭，同时已经成功为 NASA 执行了多次国际空间站货运补给和载人航天飞行任务。自 2010 年 6 月以来，猎鹰 9 系列火箭在 13 年中（截止 2023 年 10 月 10 日）已发射 263 次，其中 261 次成功（任务成功率 99.2%），一子级成功回收 219 次，复用一子级发射 194 次。2022 年“猎鹰”-9 火箭复用一级火箭占当年发射总量的 93.33%（56/60），截止 2023 年 10 月 10 日，2023 年“猎鹰”-9 火箭复用一级火箭占当年发射总量的 94.12%（64/68），SpaceX 拥有 11 枚使用次数达到 10 次以上的火箭，其中 2 枚已经“一箭十七飞”。凭借独一无二的火箭回收复用技术与高效运营，SpaceX 已经顺利实现了低成本、大中型运力、美国自主可控的航天发射能力，坐稳了全球运载第一把交椅。“猎鹰”系列火箭以出色的性能和低廉的价格，给世界航天带来大幅冲击和震动，“猎鹰”-9 商业发射报价甚至低于我国“长征”系列运载火箭。

表 10：“猎鹰”-9 火箭复用情况（截止 2023 年 10 月 10 日）

发射次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2017	13	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018	9	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019	3	3	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	5	3	4	6	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021	2	4	4	2	3	3	2	4	4	2	1	0	0	0	0	0	0
2022	4	3	4	7	6	6	5	4	2	4	5	3	3	3	1	0	0
2023	4	5	5	4	5	5	5	4	5	5	3	4	4	3	3	2	2

资料来源：SpaceX、山西证券研究所

图 25：卫星发射成本



资料来源：NewSpaceEconomy、山西证券研究所

表 11: SpaceX 公司发射任务统计表（截止 2023 年 10 月 10 日）

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
1	2006.3.24	Merlin 1A		发射失败 (一级故障)	近地轨道	FalconSAT-2 人造卫星	
2	2007.3.21	Merlin 1A		发射失败 (二级故障)	近地轨道	Demo-2/AFSS/LCT2	
3	2008.8.3	Merlin 1C		发射失败 (一级故障)	近地轨道	Trailblazer 人造卫星, Jumpstart/PreSa/Nanosail	
4	2008.9.28	Merlin 2C	火箭第一级 进入大气层 时毁坏, 无 法回收	成功	近地轨道	Ratsat 模拟卫星	
5	2009.7.14	Merlin 3C	未尝试回收 一级	成功 (级间分离失 败)	近地轨道	RazakSAT 人造卫星	
6	2010.6.4	B0003	降落伞进行 一级回收失 败	成功	近地轨道	Dragon Qualification Unit	
7	2010.12.8	B0004	失败	成功	近地轨道	COTS Demo Flight 1 (Dragon C1)	
8	2012.5.22	B0005	未尝试回收 一级	成功	近地轨道	COTS Demo Flight 2 (Dragon C2+)	
9	2012.10.8	B0006	未尝试回收 一级	部分失败 (一 级发动机飞行 80 后故障)	近地轨道	CRS-1	
10	2013.3.1	B0007	未尝试回收 一级	成功	近地轨道	CRS-2	
11	2013.9.29	B1003.1	首次尝试受 控再入返回 失败, 第三 次点 火 减 速, 但很快 关机	成功	极轨	Cassiope/5 Cubesats	
12	2013.12.3	B1004.1	未尝试回收 一级	成功	地 球 同 步 转移轨道	SES-8 卫星	
13	2014.1.6	B1005.1	未尝试回收 一级	成功	地 球 同 步 转移轨道	Thaicom 6 卫星	
14	2014.4.18	B1006.1	失败, 但实 现海面着陆	成功	近地轨道	CRS-3	
15	2014.7.14	B1007.1	未尝试回收 一级	成功	近地轨道	Orbcomm OG2 (6 sats)	
16	2014.8.5	B1008.1	未尝试回收	成功	地 球 同 步	AsiaSat 8 卫星	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
			一级		转移轨道		
17	2014.9.7	B1011.1	未尝试回收一级	成功	地球同步转移轨道	AsiaSat 6 卫星	
18	2014.9.21	B1010.1	一级回收失败	成功	近地轨道	CRS-4	
19	2015.1.10	B1012.1	一级回收失败 (下降速度过快, 火箭爆炸)	成功	近地轨道	CRS-5	
20	2015.2.11	B1013.1	天气原因, 驳船被迫撤回, 回收失败	成功	椭圆形地球轨道	气候观测 DISCOVER 卫星	
21	2015.3.2	B1014.1	未尝试回收一级	成功	地球同步转移轨道	Eutelsat 115WB/ABS 3A	
22	2015.4.14	B1015.1	一级回收失败 (一级艰难着陆并失败)	成功	近地轨道	CRS-6	
23	2015.4.27	B1016.1	未尝试回收一级	成功	地球同步转移轨道	TurkmenAlem 52 ° E/MonacoSAT	
24	2015.6.28	B1018.1	火箭解体	失败	近地轨道	CRS-7	
25	2015.12.22	B1019.1	1	成功	近地轨道	Orbcomm-OG2-M2 卫星	“猎鹰”-9 一子级首次实现地面回收
26	2016.1.17	B1017.1	一级回收失败, 三号支架没有完成锁定导致火箭倾覆	成功	近地轨道	Jason-3 卫星	
27	2016.3.4	B1020.1	一级回收失败	成功	地球同步转移轨道	SES-9 卫星	
28	2016.4.8	B1021.1	1	成功	近地轨道	CRS-8	“猎鹰”-9 一子级首次海上成功回收
29	2016.5.6	B1022.1	1	成功	地球同步转移轨道	JCSat-2B 卫星	
30	2016.5.7	B1023.1	1	成功	地球同步转移轨道	Thaicom 8 卫星	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
31	2016.6.15	B1024.1	一级回收失败	成功	超同步或高近地点转移轨道	Eutelsat 117WB/ABS2A	
32	2016.7.18	B1025.1	1	成功	近地轨道	CRS-9	
33	2016.8.14	B1026.1	1	成功	地球同步转移轨道	JCSat-16 卫星	
34	2016.9.1	B1028	——	失败	——	Amos-6 卫星	
35	2017.1.14	B1029.1	1	成功	近地轨道	Iridium NEXT 1 卫星	
36	2017.2.19	B1031.1	1	成功	近地轨道	CRS-10	
37	2017.3.16	B1030.1	一级不回收	成功	地球同步转移轨道	EchoStar 23 卫星	
38	2017.3.30	B1021.2	2	成功	地球同步转移轨道	SES-10 卫星	“猎鹰”-9 一子级实现首次复用
39	2017.5.1	B1032.1	1	成功	近地轨道	NROL-76 卫星	
40	2017.5.15	B1034.1	一级不回收	成功	地球同步转移轨道	Inmarsat-5 F4 卫星	
41	2017.6.3	B1035.1	1	成功	近地轨道	CRS-11	
42	2017.6.24	B1029.2	2	成功	超同步或高近地点转移轨道	BulgariaSat-1 卫星	
43	2017.6.25	B1036.1	1	成功	近地轨道	Iridium NEXT 2 卫星	
44	2017.7.5	B1037.1	一级不回收	成功	地球同步转移轨道	Intelsat 35e 卫星	
45	2017.8.14	B1039.1	1	成功	近地轨道	CRS-12	
46	2017.8.24	B1038.1	1	成功	太阳同步近地轨道	FormoSat-5 卫星	
47	2017.9.7	B1040.1	1	成功	近地轨道	X-37B OTV-5	
48	2017.10.9	B1041.1	1	成功	太阳同步转移轨道	Iridium NEXT 3 卫星	
49	2017.10.11	B1031.2	2	成功	地球同步转移轨道	SES-11/Echostar 105 卫星	
50	2017.10.30	B1042.1	1	成功	地球同步转移轨道	KoreaSat 5A 卫星	
51	2017.12.15	B1035.2	2	成功	近地轨道	Dragon 8.2/CRS-13	
52	2017.12.23	B1036.2	一级不回收	成功	近地轨道	Iridium NEXT 4 卫星	
53	2018.1.8	B1043.1	1	成功	近地轨道	ZUMA 卫星	
54	2018.1.31	B1032.2	不回收一级，整流罩回收一半	成功	地球同步转移轨道	GovSat-1 卫星	
55	2018.2.6	B1023.2	2	成功	火星•地球轨道	Tesla Roadster	“猎鹰”重型火箭芯级回收失败
		B1033.1	芯级失败				

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
		B1025.2	2				败，两侧助推器回收成功
56	2018.2.22	B1038.2	一级不回收，整流罩回收失败	成功	太阳同步近地轨道	Paz/Microsat 2a/b	
57	2018.3.6	B1044.1	一级不回收	成功	次同步转移轨道	Hispasat 30W-6 卫星	
58	2018.3.30	B1041.2	一级不回收，整流罩回收失败	成功	近地轨道	Iridium NEXT 5 卫星	
59	2018.4.2	B1039.2	一级不回收	成功	近地轨道	Dragon 10.2/CRS-14	
60	2018.4.18	B1045.1	1	成功	高地球椭圆轨道	TESS 卫星	
61	2018.5.11	B1046.1	1	成功	地球同步转移轨道	Bangabanthu-1 卫星	
62	2018.5.22	B1043.2	一级不回收，整流罩回收失败	成功	近地轨道	Iridium 6/GRACE-FO	
63	2018.6.4	B1040.2	一级不回收	成功	地球同步转移轨道	SES-12 卫星	
64	2018.6.29	B1045.2	一级不回收	成功	近地轨道	Dragon 11.2/CRS-15	
65	2018.7.22	B1047.1	1	成功	次同步转移轨道	Telstar 19V 卫星	
66	2018.7.25	B1048.1	1	成功	近地轨道	Iridium NEXT 7 卫星	
67	2018.8.7	B1046.2	2	成功	次同步转移轨道	Merah Putih	
68	2018.9.10	B1049.1	1	成功	次同步转移轨道	Telstar 18V 卫星	
69	2018.10.8	B1048.2	2	成功	太阳同步近地轨道	SAOCOM	
70	2018.11.15	B1047.2	2	成功	地球同步转移轨道	Es'hail 2 卫星	
71	2018.12.3	B1046.3	3	成功	太阳同步近地轨道	Spaceflight SSO-A	
72	2018.12.5	B1050.1	一级回收失败	成功	近地轨道	Dragon 12.2/CRS-16	
73	2018.12.23	B1054.1	一级不回收	成功	中地球轨道	GPSIII-01 卫星	
74	2019.1.11	B1049.2	2	成功	近地轨道	Iridium NEXT 8 卫星	
75	2019.2.22	B1048.3	3	成功	地球同步转移轨道	Nusantara Satu (PSN-6) 卫星、S5 卫星、Beresheet 登	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
						陆车	
76	2019.3.2	B1051.1	1	成功	近地轨道	DM-1/Crew Dragon	
77	2019.4.11	B1052.1	1	成功	地球同步转移轨道	ArabSat 6A 卫星	“猎鹰”重型火箭芯级和助推级全部回收成功
		B1055.1	1				
		B1053.1	1				
78	2019.5.4	B1056.1	1	成功	近地轨道	Dragon 13.2/CRS-17	
79	2019.5.24	B1049.3	3	成功	近地轨道	Starlink0.9 (60 sats)	
80	2019.6.12	B1051.2	2	成功	太阳同步近地轨道	RCM 卫星	
81	2019.6.25	B1052.2	2	成功	近地轨道	COSMIC-2 、 GPIM 、 Oculus-ASR 、 OTB-1 、 NPSAT1 、 Prox-1 、 LightSail-B、 FalconSat 7、 E-TBExA&B 、 Psat 2 、 BRICSat 2、 TEPCE 1&2、 CP9	“猎鹰”重型火箭芯级回收失败，两侧助推器回收成功，拼单发射
		B1057.1	芯级回收失败				
		B1053.2	2				
82	2019.7.25	B1056.2	2	成功	近地轨道	Dragon 8.3/CRS-18	
83	2019.8.6	B1047.3	一级不回收，整流罩回收成功	成功	地球同步转移轨道	Amos-17 卫星	
84	2019.11.11	B1048.4	4	成功	近地轨道	Starlink 1 F1	第 1 批 “星链” 1.0 版卫星
85	2019.12.5	B1059.1	1	成功	近地轨道	Dragon 6.3/CRS-19	
86	2019.12.17	B1056.3	3	成功	次同步转移轨道	JCSat-18/Kacific-1 移动宽带通信卫星	
87	2020.1.7	B1049.4	4	成功	近地轨道	Starlink 1 F2	第 2 批 “星链” 1.0 版卫星
88	2020.1.19	B1046.4	一级不回收	成功	——	载人 “龙” 飞船	
89	2020.1.29	B1051.3	3	成功	近地轨道	Starlink 1 F3	第 3 批 “星链” 1.0 版卫星
90	2020.2.17	B1056.4	一级回收失败	成功	近地轨道	Starlink 1 F4	第 4 批 “星链” 1.0 版卫星
91	2020.3.7	B1059.2	2	成功	近地轨道	Dragon 12.3/CRS-20	
92	2020.3.18	B1048.5	一级回收失败	成功	近地轨道	Starlink 1 F5	第 5 批 “星链” 1.0 版卫星
93	2020.4.22	B1051.4	4	成功	近地轨道	Starlink 1 F6	第 6 批 “星链” 1.0 版卫星
94	2020.5.30	B1058.1	1	成功	近地轨道	DM-2/Crew Dragon	
95	2020.6.4	B1049.5	5	成功	近地轨道	Starlink 1 F7	第 7 批 “星链” 1.0 版卫星
96	2020.6.13	B1059.3	3	成功	近地轨道	Starlink 1 F8/SkySat 卫星	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
97	2020.6.30	B1060.1	1	成功	中地球转移轨道	GPSIII-03 卫星	
98	2020.7.20	B1058.2	2	成功	地球同步轨道	ANASIS-II	
99	2020.8.7	B1051.5	5	成功	近地轨道	Starlink 1 F9/两颗 Global 卫星	
100	2020.8.18	B1049.6	6	成功	近地轨道	Starlink 1 F10/SkySat 卫星	
101	2020.8.30	B1059.4	4	成功	太阳同步轨道	SAOCOM-1B 、 GNOMES-1、 Sequoia 卫星	
102	2020.9.3	B1060.2	2	成功	近地轨道	Starlink 1 F11	
103	2020.10.6	B1058.3	3	成功	近地轨道	Starlink 1 F12	
104	2020.10.18	B1051.6	6	成功	近地轨道	Starlink 1 F13	
105	2020.10.24	B1060.3	3	成功	近地轨道	Starlink 1 F14	
106	2020.11.5	B1062.1	1	成功	中地球转移轨道	GPSIII-04 卫星	
107	2020.11.16	B1061.1	1	成功	近地轨道	Crew 1/Crew Dragon	
108	2020.11.21	B1063.1	1	成功	近地轨道	Sentinel-6 (A) 海洋观测卫星	
109	2020.11.25	B1049.7	7	成功	近地轨道	Starlink 1 F15	
110	2020.12.6	B1058.4	4	成功	近地轨道	CRS-21/Dragon 2 Cargo	
111	2020.12.13	B1051.7	7	成功	次同步转移轨道	高功率 S 频段广播卫星	
112	2020.12.19	B1059.5	5	成功	近地轨道	NROL-108 间谍卫星	
113	2021.1.8	B1060.4	4	成功	超同步或高近地点转移轨道	Ku 频段广播卫星	
114	2021.1.20	B1051.8	8	成功	近地轨道	Starlink 1 F16	
115	2021.1.23	B1058.5	5	成功	太阳同步轨道	携带 143 件有效载荷, 包括 10 颗星链卫星	
116	2021.2.4	B1060.5	5	成功	近地轨道	Starlink 1 F18	
117	2021.2.16	B1059.6	一级回收失败	成功	近地轨道	Starlink 1 F19	
118	2021.3.4	B1049.8	8	成功	近地轨道	Starlink 1 F17	
119	2021.3.11	B1058.6	6	成功	近地轨道	Starlink 1 F20	
120	2021.3.14	B1051.9	9	成功	近地轨道	Starlink 1 F21	
121	2021.3.24	B1060.6	6	成功	近地轨道	Starlink 1 F22	
122	2021.4.7	B1058.7	7	成功	近地轨道	Starlink 1 F23	
123	2021.4.23	B1061.2	2	成功	近地轨道	Dragon 2/Crew 2	船箭双双复用
124	2021.4.29	B1060.7	7	成功	近地轨道	Starlink 1 F24	
125	2021.5.4	B1049.9	9	成功	近地轨道	Starlink 1 F25	
126	2021.5.9	B1051.10	10	成功	近地轨道	Starlink 1 F27	首次一箭十飞

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
127	2021.5.15	B1058.8	8	成功	近地轨道	Starlink 1 F26	
128	2021.5.26	B1063.2	2	成功	近地轨道	Starlink 1 F28	
129	2021.6.3	B1067.1	1	成功	近地轨道	CRS-22/Dragon Cargo	
130	2021.6.6	B1061.3	3	成功	次同步地球转移轨道	SXM-8 卫星	
131	2021.6.17	B1062.2	2	成功	中地球转移轨道	GPSIII卫星	
132	2021.6.30	B1060.8	8	成功	太阳同步近地轨道	携带 88 件有效载荷，其中包括 3 颗“星链”卫星	
133	2021.8.29	B1061.4	4	成功	近地轨道	CRS-23/Dragon Cargo	
134	2021.9.14	B1049.10	10	成功	近地轨道	Starlink 2-1 (V1.5)	
135	2021.9.16	B1062.3	3	成功	近地轨道	载人“龙”飞船	
136	2021.11.10	B1067.2	2	成功	近地轨道	载人“龙”飞船	
137	2021.11.13	B1058.9	9	成功	近地轨道	Starlink 4-1 (V1.5)	
138	2021.11.24	B1063.3	3	成功	日心轨道	DART (Double Asteroid Redirection Test)	
139	2021.12.2	B1060.9	9	成功	近地轨道	Starlink 4-3 (V1.5)	
140	2021.12.9	B1061.5	5	成功	近地轨道	NASA 的“成像 X 射线偏振量探测器”(IXPE)天体物理学卫星	
141	2021.12.18	B1051.11	11	成功	近地轨道	Starlink 4-4 (V1.5)	
142	2021.12.19	B1067.3	3	成功	超同步或高近地点转移轨道	Turksat-5B	创造发射时间间隔记录 (15h17min)
143	2021.12.21	B1069.1	1	成功	近地轨道	CRS-24/Dragon Cargo	
144	2022.1.6	B1062.4	4	成功	近地轨道	Starlink 4-5 (V1.5) 49 颗“星链”卫星	
145	2022.1.13	B1058.10	10	成功	太阳同步轨道	20 多个国家的 105 颗卫星	
146	2022.1.18	B1060.10	10	成功	近地轨道	Starlink 4-6 (V1.5) 49 颗“星链”卫星	
147	2022.1.31	B1052.3	3	成功	太阳同步轨道	CSG-2 雷达遥感卫星	
148	2022.2.2	B1071.1	1	成功	太阳同步轨道	NROL-87	
149	2022.2.3	B1061.6	6	成功	近地轨道	Starlink 4-7 (V1.5) 49 颗“星链”卫星	
150	2022.2.21	B1058.11	11	成功	近地轨道	Starlink 4-8 (V1.5) 46 颗“星链”卫星	
151	2022.2.25	B1063.4	4	成功	近地轨道	Starlink 4-11 (V1.5)	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
						50 颗“星链”卫星	
152	2022.3.3	B1060.11	11	成功	近地轨道	Starlink 4-9 (V1.5) 47 颗“星链”卫星	
153	2022.3.9	B1052.4	4	成功	近地轨道	Starlink 4-10 (V1.5) 48 颗“星链”卫星	
154	2022.3.19	B1051.12	12	成功	近地轨道	Starlink 4-12 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
155	2022.4.1	B1061.7	7	成功	太 阳 同 步 轨道	携带 40 件有效载荷	第四次拼单发射 (Transporter-4)
156	2022.4.8	B1062.5	5	成功	近地轨道	Axiom-1	首次一个月进行 6 次发射
157	2022.4.17	B1071.2	2	成功	近地轨道	NROL-85	
158	2022.4.21	B1060.12	12	成功	近地轨道	Starlink 4-14 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
159	2022.4.27	B1067.4	4	成功	近地轨道	载人“龙”飞船 Crew-4	
160	2022.4.29	B1062.6	6	成功	近地轨道	Starlink 4-16 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
161	2022.5.6	B1058.12	12	成功	近地轨道	Starlink 4-17 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
162	2022.5.13	B1063.5	5	成功	近地轨道	Starlink 4-13 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
163	2022.5.14	B1073.1	1	成功	近地轨道	Starlink 4-15 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
164	2022.5.18	B1052.5	5	成功	近地轨道	Starlink 4-18 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
165	2022.5.25	B1061.8	8	成功	太 阳 同 步 轨道	携带 59 件有效载荷	第五次拼单发射 (Transporter-5)
166	2022.6.8	B1062.7	7	成功	地 球 同 步 转移轨道	Nilesat-301	
167	2022.6.17	B1060.13	13	成功	近地轨道	Starlink 4-19 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
168	2022.6.18	B1071.3	3	成功	太 阳 同 步 轨道	SARah 1	
169	2022.6.19	B1061.9	9	成功	近地轨道	Globalstar FM15、美国 4 件机密载荷	
170	2022.6.29	B1073.2	2	成功	地 球 同 步 转移轨道	SES-22	
171	2022.7.7	B1058.13	13	成功	近地轨道	Starlink 4-21 (V1.5) 53 颗“星链”卫星	
172	2022.7.10	B1063.6	6	成功	太 阳 同 步 轨道	Starlink 3-1 (V1.5) 46 颗“星链”卫星	
173	2022.7.14	B1067.5	5	成功	近地轨道	CRS-25	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
174	2022.7.17	B1051.13	13	成功	近地轨道	Starlink 4-22 (V1.5) 53 颗 “星链”	
175	2022.7.22	B1071.4	4	成功	太 阳 同 步 轨道	Starlink 3-2 (V1.5) 46 颗 “星链”	
176	2022.7.24	B1062.8	8	成功	近地轨道	Starlink 4-25 (V1.5) 53 颗 “星链”	
177	2022.8.4	B1052.6	6	成功	弹 道 月 球 转移轨道	Danuri	
178	2022.8.9	B1073.3	3	成功	近地轨道	Starlink 4-26 (V1.5) 52 颗 “星链”	
179	2022.8.12	B1061.10	10	成功	太 阳 同 步 轨道	Starlink 3-3 (V1.5) 46 颗 “星链”	
180	2022.8.19	B1062.9	9	成功	近地轨道	Starlink 4-27 (V1.5) 53 颗 “星链”	
181	2022.8.27	B1069.2	2	成功	近地轨道	Starlink 4-23 (V1.5) 53 颗 “星链”	
182	2022.8.30	B1063.7	7	成功	太 阳 同 步 轨道	Starlink 3-4 (V1.5) 46 颗 “星链”	
183	2022.9.4	B1052.7	7	成功	近地轨道	Starlink 4-20 (V1.5) 51 颗 “星链”、Sherpa-LTC2	
184	2022.9.10	B1058.14	14	成功	近地轨道	Starlink 4-2 (V1.5) 34 颗 “星链”、BlueWalker-3	
185	2022.9.18	B1067.6	6	成功	近地轨道	Starlink 4-34 (V1.5) 54 颗 “星链”	
186	2022.9.24	B1073.4	4	成功	近地轨道	Starlink 4-35 (V1.5) 52 颗 “星链”	
187	2022.10.5	B1077.1	1	成功	近地轨道	载人 “龙” 飞船 Crew-5	
188	2022.10.5	B1071.5	5	成功	近地轨道	Starlink 4-29 (V1.5) 52 颗 “星链”	创造新的发射时间间隔记录 (7h10min)
189	2022.10.8	B1060.14	14	成功	地 球 同 步 转移轨道	Galaxy 33、Galaxy 34	
190	2022.10.15	B1069.3	3	成功	地 球 同 步 转移轨道	Hot Bird 13F	
191	2022.10.20	B1062.10	10	成功	近地轨道	Starlink 4-36 (V1.5) 54 颗 “星链”	“猎鹰” -9 年度 第 48 次发射，打破联盟 U 的年度 发射记录
192	2022.10.27	B1063.8	8	成功	近地轨道	Starlink 4-31 (V1.5) 53 颗 “星链”	
193	2022.11.1	B1066	芯级不回收	成功	地 球 同 步	USSF-44、LDPE-2	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
		B1064.1	1		轨道		
		B1065.1	1				
194	2022.11.3	B1067.7	7	成功	地球同步转移轨道	Hot Bird 13G	
195	2022.11.12	B1051.14	一级不回收	成功	地球同步转移轨道	Galaxy 31、Galaxy 32	
196	2022.11.22	B1049.11	一级不回收	成功	地球同步转移轨道	Eutelsat 10B	
197	2022.11.26	B1076.1	1	成功	近地轨道	CRS-26	
198	2022.12.8	B1069.4	4	成功	近地轨道	OneWeb 15 任务（40 颗卫星）	
199	2022.12.11	B1073.5	5	成功	弹道月球转移轨道	HAKUTO-R 、 Rashid 、 Lunar Flashlight	
200	2022.12.16	B1071.6	6	成功	近地轨道	SWOT	
201	2022.12.16	B1067.8	8	成功	中地球轨道	O3b FM21、O3b FM22	
202	2022.12.17	B1058.15	15	成功	近地轨道	Starlink 4-37（V1.5）54 颗“星链”	首次一箭十五飞
203	2022.12.28	B1062.11	11	成功	近地轨道	Starlink 5-1（V2.0）54 颗“星链”	首次发射“星链”第二代卫星
204	2022.12.29	B1061.11	11	成功	近地轨道	EROS C-3	首次完成单月 7 次发射
205	2023.1.3	B1060.15	15	成功	太阳同步轨道	携带 115 件有效载荷	第六次拼单发射（Transporter-6）
206	2023.1.9	B1076.2	2	成功	近地轨道	OneWeb 16 任务（40 颗卫星 5）	
207	2023.1.15	B1070	芯级不回收	成功	地球同步轨道	USSF-67、LDPE-3A	
		B1064.2	2				
		B1065.2	2				
208	2023.1.18	B1077.2	2	成功	中地球轨道	GPSIII-06	
209	2023.1.19	B1075.1	1	成功	近地轨道	Starlink 2-4（V1.5）51 颗“星链”	
210	2023.1.26	B1067.9	9	成功	近地轨道	Starlink 5-2（V2.0）56 颗“星链”	“猎鹰”-9 飞行的最重有效载荷（17.4t）
211	2023.1.31	B1071.7	7	成功	近地轨道	ION SCV009 Eclectic Elena、49 颗“星链”卫星	
212	2023.2.2	B1069.5	5	成功	近地轨道	Starlink 5-3（V2.0）53 颗“星链”	
213	2023.2.6	B1073.6	6	成功	地球同步	Hispasat Amazonas Nexus	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
					转移轨道		
214	2023.2.12	B1062.12	12	成功	近地轨道	Starlink 5-4 (V2.0) 55 颗 “星链”	
215	2023.2.17	B1063.9	9	成功	近地轨道	Starlink 2-5 (V1.5) 51 颗 “星链”	
216	2023.2.17	B1077.3	3	成功	地 球 同 步 转移轨道	Inmarsat-6 F2	
217	2023.2.27	B1076.3	3	成功	近地轨道	Starlink 6-1 (V2.0 Mini) 21 颗 “星链” 卫星	
218	2023.3.2	B1078.1	1	成功	近地轨道	载人 “龙” 飞船 Crew-6	
219	2023.3.3	B1061.12	12	成功	近地轨道	Starlink 2-7 (V1.5) 51 颗 “星链”	
220	2023.3.9	B1062.13	13	成功	近地轨道	OneWeb 17 任务 (40 颗卫星)	
221	2023.3.14	B1073.7	7	成功	近地轨道	CRS-27	
222	2023.3.17	B1071.8	8	成功	近地轨道	Starlink 2-8 (V1.5) 52 颗 “星链”	
223	2023.3.17	B1069.6	6	成功	地 球 同 步 转移轨道	SES-18、SES-19	创造新的发射时间间隔记录 (4h12min)
224	2023.3.24	B1067.10	10	成功	近地轨道	Starlink 5-5 (V2.0) 56 颗 “星链”	
225	2023.3.29	B1077.4	4	成功	近地轨道	Starlink 5-10 (V2.0) 56 颗 “星链”	首次完成单月 8 次发射
226	2023.4.2	B1075.2	2	成功	近地轨道	Tranche 0A	
227	2023.4.7	B1076.4	4	成功	地 球 同 步 转移轨道	IS-40e、TEMPO	
228	2023.4.14	B1063.10	10	成功	太 阳 同 步 轨道	携带 51 件有效载荷	第七次拼单发射 (Transporter-7)
229	2023.4.19	B1073.8	8	成功	近地轨道	Starlink 6-2 (V2.0 Mini) 21 颗 “星链” 卫星	
230	2023.4.27	B1061.13	13	成功	太 阳 同 步 轨道	Starlink 3-5 (V1.5) 46 颗 “星链”	
231	2023.4.28	B1078.2	2	成功	中 地 球 轨 道	O3b FM23、O3b FM24	
232	2023.4.30	B1068	芯一级不回 收	成功	地 球 同 步 轨道	ViaSat-3 、 Aurora 4A (Arcturus)	
		B1052.8	未回收				
		B1053.3	未回收				
233	2023.5.4	B1069.7	7	成功	近地轨道	Starlink 5-6 (V2.0) 56 颗 “星链” 卫星	

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
234	2023.5.10	B1075.3	3	成功	近地轨道	Starlink 2-9 (V1.5) 51 颗“星链”卫星	
235	2023.5.14	B1067.11	11	成功	近地轨道	Starlink 5-9 (V2.0) 56 颗“星链”卫星	
236	2023.5.19	B1076.5	5	成功	近地轨道	Starlink 6-3 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
237	2023.5.20	B1063.11	11	成功	极地轨道	5 颗 Iridium NEXT、15 颗 Gen1、1 颗 Gen2	
238	2023.5.21	B1080.1	1	成功	近地轨道	Axiom-2	
239	2023.5.27	B1062.14	14	成功	地球同步 转移轨道	ArabSat 7B	
240	2023.5.30	B1061.14	14	成功	近地轨道	Starlink 2-10 (V1.5) 52 颗“星链”	
241	2023.6.4	B1078.3	3	成功	近地轨道	Starlink 6-4 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
242	2023.6.5	B1077.5	5	成功	近地轨道	CRS-28	
243	2023.6.12	B1073.9	9	成功	近地轨道	Starlink 5-11 (V2.0) 52 颗“星链”卫星	
244	2023.6.12	B1071.9	9	成功	太阳同步 轨道	携带 72 件有效载荷	第八次拼单发射 (Transporter-8)
245	2023.6.18	B1067.12	12	成功	地球同步 转移轨道	SATRIA	
246	2023.6.22	B1075.4	4	成功	近地轨道	Starlink 5-7 (V2.0) 47 颗“星链”卫星	
247	2023.6.23	B1069.8	8	成功	近地轨道	Starlink 5-12 (V2.0) 56 颗“星链”卫星	
248	2023.7.1	B1080.2	2	成功	日地拉格 朗日 L2 转 移轨道	Euclid	
249	2023.7.7	B1063.12	12	成功	近地轨道	Starlink 5-13 (V2.0) 48 颗“星链”卫星	
250	2023.7.9	B1058.16	16	成功	近地轨道	Starlink 6-5 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	首次一箭十六发
251	2023.7.15	B1060.16	16	成功	近地轨道	Starlink 5-15 (V2.0) 54 颗“星链”卫星	
252	2023.7.19	B1071.10	10	成功	近地轨道	Starlink 6-15 (V2.0 Mini) 15 颗“星链”卫星	
253	2023.7.23	B1076.6	6	成功	近地轨道	Starlink 6-6 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
254	2023.7.28	B1062.15	15	成功	近地轨道	Starlink 6-7 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	创下同一发射台 发射时间间隔最

序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
							短记录(4天3小时11分钟)
255	2023.7.28	B1074	芯级不回收	成功	地球同步转移轨道	Jupiter-3	
		B1064.3	3				
		B1065.3	3				
256	2023.8.3	B1077.6	6	成功	地球同步转移轨道	Galaxy 37、Horizons-4	
257	2023.8.6	B1078.4	4	成功	近地轨道	Starlink 6-8 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	创下同一发射台发射时间间隔最短记录(3天21小时41分钟)
258	2023.8.7	B1075.5	5	成功	近地轨道	Starlink 6-20 (V2.0 Mini) 15 颗“星链”卫星	
259	2023.8.11	B1069.9	9	成功	近地轨道	Starlink 6-9 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	第 100 批星链卫星发射(不包括测试星 Tintin A&BB)
260	2023.8.16	B1067.13	13	成功	近地轨道	Starlink 6-10 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
261	2023.8.22	B1061.15	15	成功	近地轨道	Starlink 7-1 (V2.0 Mini) 21 颗“星链”卫星	
262	2023.8.26	B1081.1	1	成功	近地轨道	载人“龙”飞船 Crew-7	
263	2023.8.26	B1080.3	3	成功	近地轨道	Starlink 6-11 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
264	2023.8.31	B1077.7	7	成功	近地轨道	Starlink 6-13 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
265	2023.9.2	B1063.13	13	成功	近地轨道	Tranche 0B	
266	2023.9.3	B1073.10	10	成功	近地轨道	Starlink 6-12 (V2.0 Mini) 21 颗“星链”卫星	
267	2023.9.8	B1076.7	7	成功	近地轨道	Starlink 6-14 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
268	2023.9.11	B1071.11	11	成功	近地轨道	Starlink 7-2 (V2.0 Mini) 21 颗“星链”卫星	
269	2023.9.15	B1078.5	5	成功	近地轨道	Starlink 6-16 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
270	2023.9.19	B1058.17	17	成功	近地轨道	Starlink 6-17 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	首次一箭十七飞
271	2023.9.23	B1060.17	17	成功	近地轨道	Starlink 6-18 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
272	2023.9.25	B1075.6	6	成功	近地轨道	Starlink 7-3 (V2.0 Mini) 21 颗“星链”卫星	

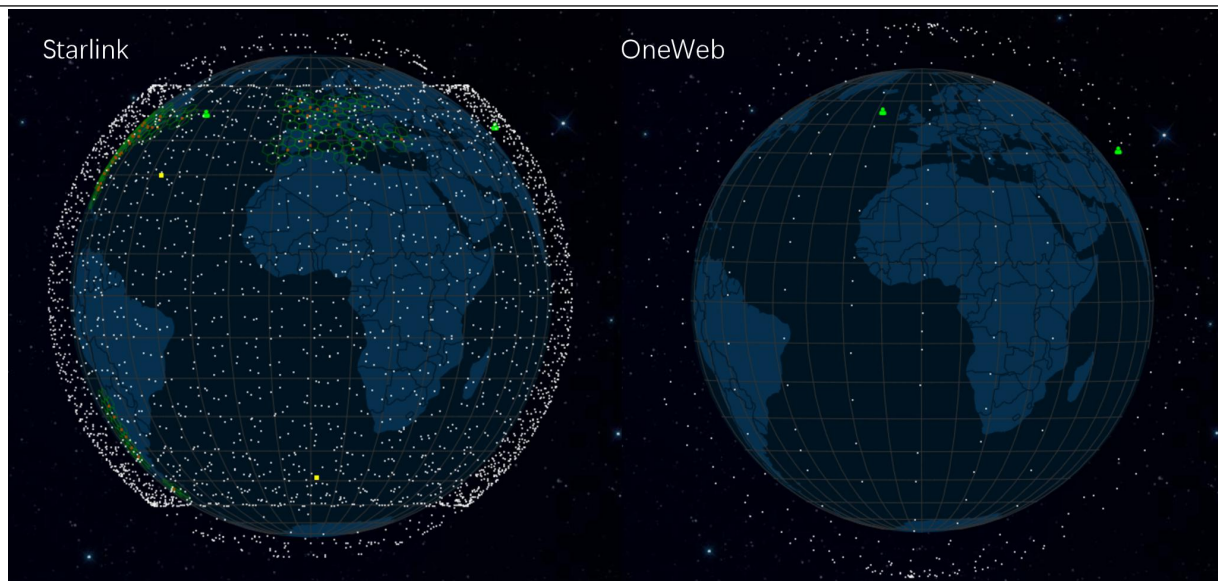
序号	日期	火箭编号	回收次数	发射结果	部署轨道	载荷	备注
273	2023.9.29	B1069.10	10	成功	近地轨道	Starlink 6-19 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
274	2023.10.5	B1076.8	8	成功	近地轨道	Starlink 6-21 (V2.0 Mini) 22 颗“星链”卫星	
275	2023.10.9	B1063.14	14	成功	近地轨道	Starlink 7-3 (V2.0 Mini) 21 颗“星链”卫星	

资料来源：SpaceX、《透视 Space X 公司 20 年发展历程（2002-2022）》、维基百科、山西证券研究所（注：火箭编号 B1 表示火箭一子级，后三位是火箭编号，“.1”表示新火箭，大于 1 表示复用次数）

“星链”星座补齐商业闭环，后续实践明显有助于军事利用。卫星星座兴起于 20 世纪 90 年代，通过利用低轨卫星的覆盖优势，可以摆脱铺设光纤电缆的高成本基建，为偏远地区和发展中国家提供快速、廉价的网络连接服务，还可以通过卫星通信系统提升现有互联网主干的速度，形成天地一体化全球无缝覆盖的信息网络。但是上世纪 90 年代由于小型通信卫星研制与发射费用较高，导致系统建设耗资巨大，而相比发展迅猛的地面移动通信，卫星互联网通信速率低，费用高，终端昂贵，潜在市场有限，于是在 2000 年前后低轨通信与星座系统建设进入长达十余年的建设低潮，之后随着火箭发射成本降低、卫星制造能力提升以及集成电路技术的进步等，低轨卫星通信系统悄然复苏。2015 年 SpaceX 宣布投资“星链”星座，计划 2024 年部署完成 4425 颗卫星，2027 年部署完成 7518 颗卫星，预备占位卫星 30000 颗，共计 42000 颗卫星，是全球迄今为止规模最大的卫星星座项目。SpaceX 低成本火箭的研发成功促成了“星链”计划的大规模建设，而“星链”计划的可观收入将用于支持 SpaceX 未来火星探索和移民计划的巨大投资。2019 年 SpaceX 以一箭 60 星的方式首次发射“星链”卫星，目前已发射了 5000 多颗低地球轨道小卫星。从 2020 年开放服务至 2023 年 9 月，“星链”已覆盖 7 个大洲，60 多个国家，连接超过 200 万用户，初步部署成功后，预期每年可以带来几百亿美元的收益。2022 年 2 月俄乌冲突爆发后，乌克兰通过“星链”实现对原有地面互联网基础设施的替代，展示了一个可扩展、弹性巨型星座架构的能力，“星链”计划突破了商业边界。2022 年 12 月 SpaceX 公司发布了“星盾（Starshield）”计划，该计划平行于“星链（Starlink）”项目，旨在为美国提供全球部署的卫星遥感、加密通信、其他军用平台模块化托管能力。该计划基于“星链”的技术和生产线，并与“星链”通信兼容。“星盾”计划利用“星链”卫星星座，为美国情报机构、国防部等部门提供数据加密传输、战场信息感知等多项服务，特别是为美军一直欠缺的战场高通量信息传输、战场卫星遥感信息获取等方面提供支持，将有效增强美军侦察遥感、

通信中继、导航定位、精确打击等作战能力。

图 26: Starlink 星座与 OneWeb 星座对比



资料来源: Satellitemap.space、山西证券研究所

SpaceX 公司制胜的关键就是低成本。SpaceX 始终坚持“简单、低成本、高可靠”的经营理念，使用货架产品结合成熟技术，并在合理范围内大胆使用新材料和新工艺，打造出了性能较好的经济适用的金牌火箭，并以单一型号火箭撑起了美国几乎整个航天发射能力。SpaceX 火箭低成本的原因是复杂而多层次的，既有来自外部美国政府在资金、政策和技术等方面的支持，也有源于 SpaceX 自身在设计理念、生产制造、配套采购、管理模式等方面寻求的低成本方法和策略。

表 12: SpaceX 火箭低成本的原因分析

因素	说明
外因	资金 NASA 于 2006 年、2008 年和 2010 年相继推出“商业轨道运输服务计划”（COTS）、空间站“商业补给服务”（CRS）和“商业成员计划”（CCP）三大计划，为商业航天提供资金支持。到 2018 年底，SpaceX 从美国政府得到的各类经费高达 80 亿美元，其中 NASA 提供的资金大约 72 亿美元，美国空军提供的资金大约 9.6 亿美元，成为 SpaceX 公司早期运营的支柱
	政策 美国发布一揽子法律制度和资助计划，将技术成熟的低地球轨道发射、运输空间站建设和运营等逐渐转变为商业性活动，将 NASA 的战略使命全面转向深空探测
	技术 NASA 和 SpaceX 之间签订的航天法案协议中，有 10 项是由 NASA 为 SpaceX 公司提供技术支持，涉及的技术领域包括运载火箭研制、发动机建模、增持制造技术、成员舱显示和控制技术、航天器结构的表面化学和材料分析、载人飞船试车监控所需的激光光谱技术等
	设施 租用了美国空军卡纳维拉尔角的 LC-40 和 LC-13 发射工位，以及范登堡空军基地的 LC-4E 和 LC-4W 发射工位；租用了 NASA 的肯尼迪航天中心 LC-39A 和 LC-39B 发射工位；试验设施方面，利用了 NASA 所属的多个中心提供各类支持和服务，包括斯坦尼斯航天中心提供发动机试车设施和技术支

因素		说明
		持，白沙靶场试验设施提供危险物品方面的试验、分析和培训，格林研究中心提供电源试验方面的支持，戈达德航天中心提供无线电（射频）试验方面的支持
内 因	设计 理念	产品化设计 公司在产品研制过程中特别注重产品的通用化和标准化，改变了运载火箭“逐枚定制”的生产方式，除了超重-星舰外，所有型号的火箭均采用梅林系列发动机，二级发动机由一级发动机按适应真空环境改进而来，在箭体结构设计和导航控制电气设备等方面尽力通用，以批量生产降低所分摊的设计费用并降低生产成本
		可重复使用 通过对火箭进行回收，经过简单维修后重复使用，可以避免一次性使用后抛弃昂贵的箭体结构、发动机及电气设备造成的浪费，并通过多次发射使用，分摊硬件产品的生产制造成本，从而实现平均发射成本的大幅降低
	生产制造 公司自主研制生产了火箭主发动机、上面级发动机、主发动机涡轮泵、低温贮罐结构和制导系统等技术含量高且占硬件设备成本比例大的关键核心设备，在掌握了核心科技的基础上也避免了采购价格受制于供应商；对于外购成本明显高于自身研发制造成本的部分单机设备，如电气单机、阀门等产品，公司也采取自身研发的方式控制成本	
	配套采购 在选择原材料及元器件时，尽可能合理避免昂贵的航天级产品，尽量寻找商业化的软硬件产品，比如箭体的底层操作系统采用 Linux 系统，提高与民用设备之间的兼容性，控制器硬件采用了 Intel 双核的 x86 处理器	
	管理模式 摒弃分包，最大限度地把研发、设计和生产维持在企业内部，保证了公司的生产效率和产品迭代速度；采用高效扁平化管理，使得企业高度一体化，有意识模糊部门界限以促进信息交流，缩短信息链条，为火箭型号的研制提供了重要保证，从而在提高效率的同时可以维持较低的日常开支；采用小型科研团队进行各项研发工作，团队主管都是亲自在一线进行指导部署，一起参与各个开发设计阶段，加快了工程进度并提高了工程质量	
	商业模式 公司发布了《有效载荷运载共享用户指南》，就卫星搭载要求、机械和电气接口标准、流程规范进行说明，实现了单箭大量卫星共享拼单发射，“猎鹰”-9 火箭一箭承接各类大中小型卫星发射任务，进一步降低了单次发射成本	

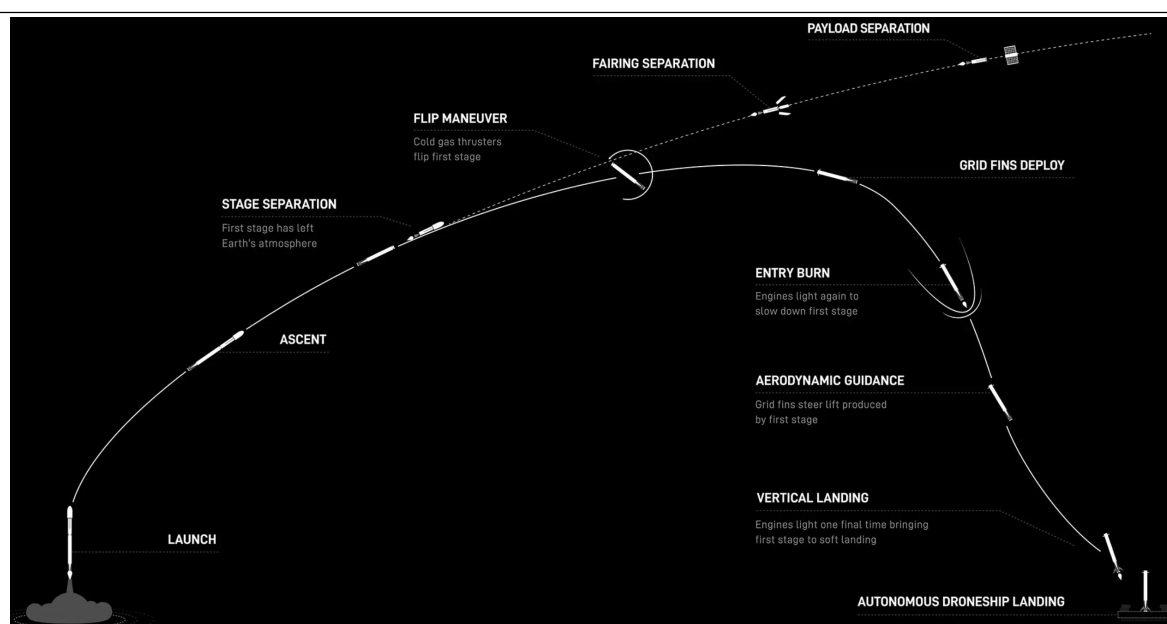
资料来源：《透视 Space X 公司 20 年发展历程（2002-2022）》、山西证券研究所

运载火箭可复用技术创新是低成本的主要原因。“猎鹰”-9 火箭的成本约 5000~6000 万美元，推进剂成本只有 20 万美元，只有运载火箭可复用才能推动发射成本实现数量级上的降低，根据 SpaceX 发布的数据，在技术进一步成熟后，仅一子级回收多次重复使用即可降低发射成本的 80%。目前，在航天领域回收航天器有四种方式：一是利用降落伞垂直下降，我国“神舟”飞船的返回舱就采用了这种回收方式；二是在动力辅助下通过滑翔飞行进行回收，苏联的“暴风雪”航天飞机就是采用了这种回收方式；三是单纯通过滑翔飞行达到水平着陆，美国的航天飞机和 X-37B 采用了这种回收方式；四是通过动力反推完成垂直回收，SpaceX 的“猎鹰”-9 火箭就是选择了这种方式。方式二和方式三的共同特点是垂直起飞水平降落，采用带翼飞回式结构，曾是美国和苏联航天飞机选择的回收方式，但是由于航天飞机规模过大、结构过于复杂、维修量过大、发射操作不够灵活、飞行次数与发射频率太低等从而造成很高的操作费用，最终

并没有实现降低发射成本。SpaceX 公司最初曾选择伞降方式，但是由于液体火箭贮箱难以承受落海时不可控的巨大冲击，以及价值量最大的液体火箭发动机难以承受海水的浸泡和侵蚀，而且同期进行的垂直起飞垂直降落测试的“蚱蜢”原型机不断取得突破，所以在尝试几次伞降回收失败后，“猎鹰”-9 最终选择了垂直回收模式。

根据公众号小火箭的《SpaceX 可回收火箭技术与成本分析》的测算，如果 SpaceX 公司能够把对第一级火箭的检测维修成本控制在 295 万美元以内的话，同一枚火箭的第 8 次发射的报价将会是一次性火箭的一半。

图 27：“猎鹰”-9 一子级海上回收轨迹图



资料来源：SpaceX、山西证券研究所

相比航天飞机的水平滑翔回收，采用垂直回收方式会有新的技术难度。垂直回收技术主要遇到四大技术难题：（1）再入隔热难度大。完全可重复使用火箭采用传统圆柱体外形，相比流线型升力体外形，在再入返回时，所承受的气动热环境和气动载荷环境将比发射时更加恶劣，需要材料具备耐超高温和气流冲蚀的特性；（2）姿态控制难度大。在返回过程中，火箭各子级再入速度大，在 5km~20km 高度经过“大风区”时，会受到很大干扰，同时在返回过程中子级还要在恰当的时候点火反推减速，并在着陆前调整为垂直姿态，这些对于长径大的火箭来说，控制难度很高；（3）发动机推力调节难。大范围的推力调节对燃烧室、涡轮泵、阀门等各组件要求较高，需要实现较宽范围推力调节的发动机系统配置，阀门必须适应较高的混合比偏差控制；（4）着陆减载缓冲难。在可重复使用火箭返回过程中，着陆支撑机构是不可缺少的，火箭着陆属于硬接触，冲击过载大，需要着陆支撑机构在强度足够的同时拥有良好缓冲功能，同时

还需要适应着陆过程中火箭的倾斜姿态和水平速度，由于着陆支撑机构位于火箭发动机周围，着陆过程中主发动机会点火减速，因此还需要具备抗发动机喷流的热防护能力。

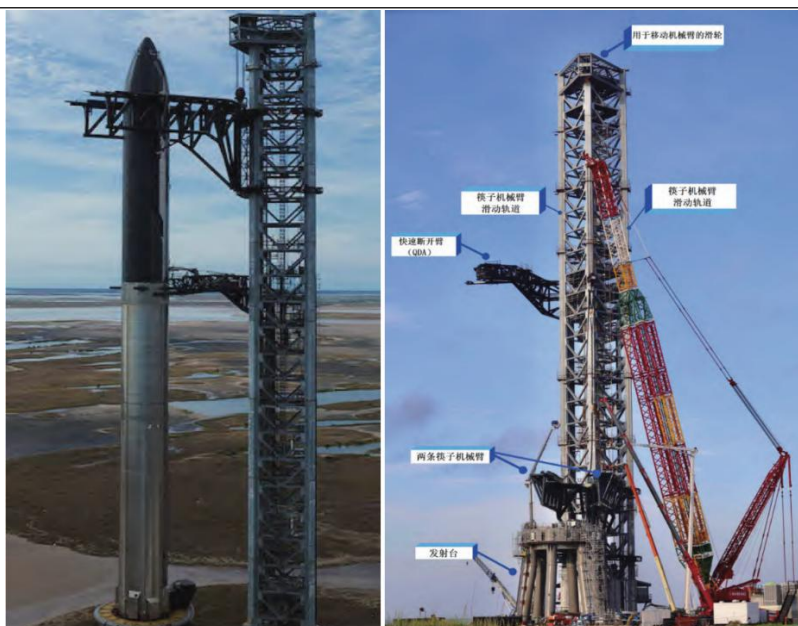
表 13：“猎鹰”-9 子一级重复使用突破的三大关键技术

关键技术	说明
“梅林”-1D 发动机重启与推力控制技术	“梅林”-1D 可多次重启，节流能力 50%~120%，可通过节流和喷管摆动实现推力控制
火箭下降控制系统技术	控制系统由惯性系统、全球定位系统接收机、液氮推力系统、控制计算机和组件等构成，通过栅格舵、液氮推进器和发动机的复合控制，以及数据链技术的运用，实现下降过程的高精度姿态控制
重复使用火箭着陆系统技术	着陆架采用了碳纤维铝合金蜂窝结构，碳纤维结构减少重量，降低了发射成本，铝合金材质保证了着陆架强度，而蜂窝结构提供了缓冲吸能的属性

资料来源：《透视 Space X 公司 20 年发展历程（2002-2022）》、山西证券研究所

在采用着陆架回收日趋成熟之后，2021 年 SpaceX 开始尝试采用发射塔架机械臂回收“超重”火箭级。在“超重”火箭级回收过程中，当“超重”火箭垂直降落到一定高度后，将顶部的四个栅格舵锁定为水平位置，通过发动机的推力调节和摆动以一个角度逐步靠近发射塔，在达到悬停状态后，机械臂展开通过栅格舵托住“超重”助推器，然后发动机关机熄火，随后机械臂移动将“超重”火箭级精确放置到发射台上，实现快速回收复用。通过机械臂捕获的好处是节省了着陆架的质量和成本（包括回收后的检修和更换），最主要的是可以更加迅速地将“超重”火箭级重新定位于发射塔架上，有效缩短两次发射任务之间的准备时间。

图 28：“超重-星舰”在发射捕获塔旁（左）和发射捕获塔结构（右）



资料来源：《SpaceX “超重-星舰” 运输系统研制进展》、山西证券研究所

4. 国内商业火箭企业发展

2014 年，国务院出台《关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见》，鼓励民间资本研制、发射和运营商业遥感卫星。2015 年，国家发改委、财政部、国防科工局联合印发了《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015-2025 年）》，支持和引导社会资本参与国家民用空间基础设施建设和应用开发。自此中国航天产业向民营资本打开大门，商业航天迎来了快速发展期，在政策鼓励和资本助推下，商业航天公司数量持续增长，到 2020 年与运载火箭相关的企业就有十多家。

表 14：国内主要商业火箭公司（不完全列表）

名称	成立时间	公司性质	代表产品
航天科工火箭技术有限公司	2016	国有企业	“快舟”、“羽舟”、“巧舟”、“轻舟” 火箭
中国长征火箭有限公司	2016	国有企业	“长征” 火箭
深圳翎客航天技术有限公司	2014	民营企业	RLV-T 系列火箭
北京蓝箭航天空间科技有限公司	2015	民营企业	“朱雀” 系列火箭
北京零壹空间科技有限公司	2015	民营企业	“灵龙” 系列火箭
北京天兵科技有限公司	2015	民营企业	天龙系列火箭
北京星际荣耀空间科技有限公司	2016	民营企业	双曲线系列火箭
江苏深蓝航天有限公司	2016	民营企业	星云系列火箭
北京九州云箭空间科技有限公司	2017	民营企业	“凌云”、“龙云” 液氧甲烷发动机
北京星途探索科技有限公司	2017	民营企业	“探索一号”、“星途一号”
北京星河动力空间科技有限公司	2018	民营企业	“谷神星” 火箭
广州中科宇航探索技术有限公司	2018	民营企业	力箭系列火箭
北京宇航推进科技有限公司	2018	民营企业	“沧龙一号”、“沧龙二号” 液氧甲烷发动机
山东东方空间科技有限公司	2020	民营企业	“引力” 系列运载火箭

资料来源：公司官网、山西证券研究所

由于固体火箭设计简单，成本较低，国内大多数民营运载火箭公司选择从研制小型固体火箭开始，初步开启商业航天的服务模式，之后再实现向液体火箭的升级，开展中型、大型火箭以及可重复使用火箭的研发。中国航天科技集团推出的商业固体运载火箭 CZ-11 系列和捷龙系列，以及中国航天科工集团推出的商业固体运载火箭快舟系列已经圆满完成多次飞行试验，技术较为成熟，民营商业航天企业星际荣耀的“双曲线”一号、星河动力的“谷神星”一号以及中科宇航的“力箭一号”固体运载火箭已经在过去几年成功发射，解决了有无问题。国内民商液体火箭目前大部分处于研制阶段，预计未来几年将迎来集中首飞。

表 15：国内主要商业火箭公司液体发动机研制进度（不完全列表）

公司	发动机	燃料	真空推力 (吨)	燃气发生器 试车	半系统试车	全系统试车	长程试车 (≥200 秒)	二次（多次） 启动试车
蓝箭航天	天鹊 TQ-12	甲烷	80	2019.1.7	2019.3.25	2019.5.17	2019.10.26	2022.8
	天鹊 TQ-11	甲烷	10	2017.12.14		2019.11.30	2020.3	
星际荣耀	焦点 1 号	甲烷	15	2018.5.31	2019 上半年		2019.7	2020.5.27
	焦点 2 号	甲烷	100	2022.9.2		2023.9.27		
星河动力	苍穹	煤油	50	2019.7.6		2022.2		
宇航推进	沧龙一号	甲烷	60	2019.4				
	沧龙二号	甲烷	10	2019.12	2022.11	2023.1	2023.3	
九州云箭	龙云	甲烷	80	2019.6	2021.3	2021.5	2021.6	2021.5
	凌云	甲烷	10				2021.7	2021.3
深蓝航天	雷霆 R1	煤油	20	2019.4		2022.7		2022.9.29
天兵科技	天火 11	煤油	30			2021.5		
	天火 12	煤油	110		2022.9	2022.11		

资料来源：公司官网、公司公众号、山西证券研究所

表 16：国内民营火箭公司发射统计表

序号	公司	时间	火箭型号	火箭序号	类型	发射结果	部署轨道	任务载荷	备注
1	蓝箭科技	2018.10.27	朱雀一号	——	固体火箭	失败	太阳同步轨道	“未来号”卫星	
2	零壹空间	2019.3.27	OS-M	——	固体火箭	失败	——	灵雀-1B 技术验证卫星	
3	星际荣耀	2019.7.25	双曲线一号	遥一	固体火箭	成功	近地轨道	气球卫星、BP-1B、央视未来新星验证载荷、西瓜创客载荷、星时代-6 载荷	中国民营航天首次成功入轨
4	星河动力	2020.11.7	谷神星一号	遥一	固体火箭	成功	太阳同步轨道	天启星座十一星	
5	星际荣耀	2021.2.1	双曲线一号	遥二	固体火箭	失败	太阳同步轨道	——	
6	星际荣耀	2021.8.3	双曲线一号	遥五	固体火箭	失败	太阳同步轨道	吉林一号魔方 01A	
7	星河动力	2021.12.7	谷神星一号	遥二	固体火箭	成功	太阳同步轨道	天津大学一号、丽泽一号、宝酝号、金紫荆五号、金紫荆一号 03 星	
8	星际荣耀	2022.5.13	双曲线一	遥四	固体火	失败	太阳同步	吉林一号魔方	

			号		箭		轨道	01A (R)	
9	中科宇航	2022.7.27	力箭一号	遥一	固体火箭	成功	——	空间新技术试验卫星、轨道大气密度探测试验卫星、低轨道量子密钥分发试验卫星、电磁组装试验双星、南粤科学星	
10	星河动力	2022.8.9	谷神星一号	遥三	固体火箭	成功	太阳同步轨道	泰景一号 02 星、平安三号卫星、东海一号卫星	
11	星河动力	2022.11.16	谷神星一号	遥四	固体火箭	成功	太阳同步轨道	吉林一号高分 03D08、51、52、53、54 星	
12	蓝箭航天	2022.12.14	朱雀二号	遥一	液体火箭	失败	太阳同步轨道	——	
13	星河动力	2023.1.9	谷神星一号	遥五	固体火箭	成功	太阳同步轨道	科技壹号卫星、天启星座 13 星、天目一号气象星座 01/02 星、南通中学号卫星	
14	天兵科技	2023.4.2	天龙二号	遥一	液体火箭	成功	太阳同步轨道	“爱太空科学号”遥感卫星	我国商业航天首款成功入轨的液体运载火箭
15	星际荣耀	2023.4.7	双曲线一号	遥六	固体火箭	成功	太阳同步轨道	——	
16	中科宇航	2023.6.7	力箭一号	遥二	固体火箭	成功	——	试验 24 号 A/B 卫星、X 射线偏振探测立方星、涪城一号、TY26、西安航投 8 号等 26 星	“一箭 26 星”刷新了我国一箭多星最高纪录
17	蓝箭航天	2023.7.12	朱雀二号	遥二	液体火箭	成功	太阳同步轨道	——	世界首次成功入轨的液氧甲烷火箭
18	星河动力	2023.7.22	谷神星一	遥六	固体火	成功	——	乾坤一号卫	

			号		箭			星、星时代-16 卫星	
19	星河动力	2023.8.10	谷神星一 号	遥七	固体火 箭	成功	太 阳 同 步 轨道	西 光 壹 号 01 星，星池一号 B 星，地卫智 能应急一号卫 星，以及西安 航投 88 号、96 号、104 号、 112 号卫星	
20	星河动力	2023.8.25	谷神星一 号	遥八	固体火 箭	成功	太 阳 同 步 轨道	吉林一号宽幅 02A 星	
21	星河动力	2023.9.5	谷神星一 号海射型	遥一	固体火 箭	成功	近地轨道	天 启 星 座 21~24 星 共 4 颗卫星	中国民营航 天首次海上 发射成功
22	星河动力	2023.9.21	谷神星一 号	遥十一	固体火 箭	失败	太 阳 同 步 轨道	吉林一号高分 04B 星	

资料来源：公司官网、公司公众号、山西证券研究所

5. 投资建议

2023 年中国商业航天大爆发，前三季度全国民营火箭共发射 10 次，成功 9 次，创下了中国商业航天发展八年来的新记录，中国商业航天产业正迈入高速发展期，火箭制造的上游将率先受益，我们推荐航天连接器龙头航天电器、航天电子设备配套龙头航天电子、碳纤维预浸料龙头中航高科、T/R 组件龙头国博电子以及特种电源巨头新雷能。

5.1 航天电器

连接器是系统或整机电路中负责电气连接或信号传输的关键必备基础元器件，公司主导产品用于航天、航空、电子、兵器、船舶、通信、轨道交通、能源装备等高技术领域配套。随着我军新型导弹武器和航空装备的定型量产加速，以及全军实战化演练频次增加带来的消耗增多，公司作为关键必备基础元器件配套企业将直接受益。

定增项目稳步实施，持续推进产能提升。公司持续推进生产基地建设，定增募资扩充产能，募投项目涉及公司军民用连接器、继电器、电机和光模块业务板块，项目预计 2023 年 12 月建成投产，公司将打破产能瓶颈，满足下游不断增长的军民用需求，实现十四五期间高速发展。

风险提示：连接器订单不及预期；募投项目进展不及预期。

5.2 航天电子

航天电子是航天科技集团旗下从事航天电子测控、航天电子对抗、航天制导、航天电子元器件专业的高科技上市公司。公司航天电子产品主要包括综合信息系统、惯性导航、集成电路、机电组件等，包括了从器件、组件、设备到系统级的产品，广泛应用于运载火箭、飞船、卫星等航天领域，并保持着较高的配套比例。公司加快无人系统及高端智能装备体系核心技术研发，突破体系仿真、无人指控、集群通信等关键技术，市场开拓不断取得新突破，市场份额稳步提升，打造出无人系统新增长极。

2022 年 10 月证监会批准了公司的定增申请，公司拟定增募集资金，用于智能无人系统装备、智能电子及卫星通信产品、惯性导航系统装备三大领域的产业化项目，项目建设期在 18~36 个月，后续随着募投项目的顺利推进，科研成果转化有望加速，产能有望进一步释放。

风险提示：下游需求不及预期；募投项目进展不及预期；新产品研发进度不及预期。

5.3 中航高科

碳纤维复合材料在航空结构轻量化中具有无可替代的材料性能，不需要考虑过载更专注于机动性能的无人机相比于载人飞机碳纤维复合材料用量占比更高。碳纤维复合材料经过多年发展已经从最初的非承力构件发展到应用于次承力和主承力构件，应用比例不断提升，公司聚焦碳纤维预浸料产品，处于碳纤维产业链核心枢纽环节。公司承担了多型航空新装备所需预浸料产品的研制、生产和供应，具有垄断优势。

航空装备和复合材料技术迎来跨代发展机遇，公司航空复材业务进入高速成长期。随着新型航空装备和导弹的大规模列装，以及国产大飞机 C919 完成适航认证，军民航空装备需求上升叠加复合材料应用比例不断提高，公司作为主要的预浸料供应商，航空复材业务将进入高速成长期。

风险提示：航空复合材料需求不及预期；生产交付不及预期。

5.4 国博电子

国博电子专注于有源相控阵 T/R 组件和射频集成电路相关产品的研发、生产和销售。公司有源相控阵 T/R 组件主要应用于精确制导武器的雷达导引头、机载雷达、舰载雷达、卫星通信等领域。公司射频模块及射频芯片主要应用于移动通信基站等通信系统。目前公司在 6G 相关技术的卫星互联网组件、毫米波芯片等多方向上持续研发跟进，并具备相关技术储备。

国博电子整合中国电科五十五所资源，主要客户均为国内军工集团，除整机用户内部配套外，是国内面向各军工集团销量最大的有源相控阵 T/R 组件研发生产平台，为各型装备配套研制了数百款有源相控阵 T/R 组件，其中定型或技术水平达到固定状态产品数十项，产品广泛应用于弹载、机载等领域，具备技术和市场优势，标的稀缺性强。

风险提示：新型雷达、导弹列装不及预期；民品需求不及预期；募投项目进展不及预期。

5.5 新雷能

电源是一切电子设备的核心，尤其是工作于航空航天等特种应用环境下的电子设备，对电源产品在极端工作温度、剧烈冲击/加速度、低气压等严酷环境下的性能要求很高，另外各种部件用电需求差异性高，对于安全性和可靠性要求高，定制化水平高。

新雷能在导弹电源、雷达电源、航天产品电源领域具有核心技术优势，在新型重点型号战

术、战略导弹、雷达、航天电子设备电源产品领域占比较高。这些总体类产品已经完成了小批量生产进入大批量生产时期，全军为实现新时期使命任务对此类产品需求增长较大，该类产品业绩进入高速成长期。随着航空航天市场规模的逐年上升，以及电气化水平大幅提升带动的单位航空航天装备所需的电源产品同比增加，公司持续加大航空航天特种领域研发投入，航空航天领域电源产品进入批量交付阶段的品种和数量持续增加。

风险提示：军品订单不及预期；民品需求不及预期；募投项目进度不及预期。

表 17：重点覆盖公司盈利预测及估值

证券代码	证券名称	收盘价		EPS			PE				投资评级
		2023/11/2	2022A	2023E	2024E	2025E	2022A	2023E	2024E	2025E	
002025.SZ	航天电器	51.48	1.22	1.74	2.35	3.28	42.20	29.59	21.91	15.70	增持-A
600879.SH	航天电子	7.93	0.19	0.21	0.26	0.30	41.74	37.76	30.50	26.43	增持-A
600862.SH	中航高科	24.38	0.55	0.66	0.83	1.02	44.33	36.94	29.37	23.90	增持-A
688375.SH	国博电子	82.41	1.30	1.56	2.10	2.83	63.39	52.83	39.24	29.12	增持-A
300593.SZ	新雷能	16.56	0.53	0.61	0.79	1.05	31.25	27.15	20.96	15.77	买入-A

资料来源：、山西证券研究所整理

6. 风险提示

（1）火箭研制进度不及预期。火箭研制具有高技术、高投入和高风险特征，研发难度大，研发周期较长，试验费用较大，质量要求苛刻，火箭研发存在达不到预定任务目标、预期性能指标以及研制费用超支、研制周期拖延等风险。

（2）可靠性不足。目前民商航天企业仍处于初创探索阶段，技术方案仍在不断迭代优化，型号系列仍需任务磨砺，飞行子样尚需不断积累，产品质量管控仍需不断增强，存在火箭发射连续失利的风险，可靠性有待持续提高。

（3）星座建设进度不及预期。星座建设受到火箭运力、技术突破、宏观环境、频轨资源等多种因素影响，建设计划存在取消、延迟等可能性，从而导致星座建设进度不及预期。

（4）下游卫星应用市场拓展不及预期。由于下游卫星应用商业前景的价值潜力尚不明朗，如果卫星发射成本持续过高，卫星应用市场拓展进度可能不及预期。

分析师承诺：

本人已在中国证券业协会登记为证券分析师，本人承诺，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本人对证券研究报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规，研究方法专业审慎，分析结论具有合理依据。本报告清晰准确地反映本人的研究观点。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点直接或间接接受到任何形式的补偿。本人承诺不利用自己的身份、地位或执业过程中所掌握的信息为自己或他人谋取私利。

投资评级的说明：

以报告发布日后的 6--12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。

无评级：因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见的结果的重大不确定事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。（新股覆盖、新三板覆盖报告及转债报告默认无评级）

评级体系：**——公司评级**

- 买入： 预计涨幅领先相对基准指数 15%以上；
- 增持： 预计涨幅领先相对基准指数介于 5%-15%之间；
- 中性： 预计涨幅领先相对基准指数介于-5%-5%之间；
- 减持： 预计涨幅落后相对基准指数介于-5%- -15%之间；
- 卖出： 预计涨幅落后相对基准指数-15%以上。

——行业评级

- 领先大市： 预计涨幅超越相对基准指数 10%以上；
- 同步大市： 预计涨幅相对基准指数介于-10%-10%之间；
- 落后大市： 预计涨幅落后相对基准指数-10%以上。

——风险评级

- A： 预计波动率小于等于相对基准指数；
- B： 预计波动率大于相对基准指数。

免责声明：

山西证券股份有限公司(以下简称“公司”)具备证券投资咨询业务资格。本报告是基于公司认为可靠的已公开信息，但公司不保证该等信息的准确性和完整性。入市有风险，投资需谨慎。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，公司不对任何人因使用本报告中的任何内容引致的损失负任何责任。本报告所载的资料、意见及推测仅反映发布当日的判断。在不同时期，公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。公司或其关联机构在法律许可的情况下可能持有或交易本报告中提到的上市公司发行的证券或投资标的，还可能为或争取为这些公司提供投资银行或财务顾问服务。客户应当考虑到公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突。公司在知晓范围内履行披露义务。本报告版权归公司所有。公司对本报告保留一切权利。未经公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯公司版权的其他方式使用。否则，公司将保留随时追究其法律责任的权利。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此声明，禁止公司员工将公司证券研究报告私自提供给未经公司授权的任何媒体或机构；禁止任何媒体或机构未经授权私自刊载或转发公司证券研究报告。刊载或转发公司证券研究报告的授权必须通过签署协议约定，且明确由被授权机构承担相关刊载或者转发责任。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此提示公司证券研究业务客户不得将公司证券研究报告转发给他人，提示公司证券研究业务客户及公众投资者慎重使用公众媒体刊载的证券研究报告。

依据《证券期货经营机构及其工作人员廉洁从业规定》和《证券经营机构及其工作人员廉洁从业实施细则》规定特此告知公司证券研究业务客户遵守廉洁从业规定。

山西证券研究所：

上海

上海市浦东新区滨江大道 5159 号陆家嘴滨江中心 N5 座 3 楼

太原

太原市府西街 69 号国贸中心 A 座 28 层
电话：0351-8686981
<http://www.i618.com.cn>

深圳

广东省深圳市福田区林创路新一代产业园 5 栋 17 层

北京

北京市丰台区金泽西路 2 号院 1 号楼丽泽平安金融中心 A 座 25 层

