

国防军工行业深度报告

火箭回收开启航天新篇章，液体火箭引领未来航天技术发展

增持（维持）

2024年06月14日

证券分析师 苏立赞

执业证书：S0600521110001

sulz@dwzq.com.cn

证券分析师 许牧

执业证书：S0600523060002

xumu@dwzq.com.cn

研究助理 高正泰

执业证书：S0600123060018

gaozht@dwzq.com.cn

投资要点

- 运载火箭是实现航天飞行的核心载体：**火箭通过发动机喷射工质产生的反作用力推进，主要分为运载火箭和探空火箭两种。运载火箭能将人造卫星、载人飞船等有效载荷送入预定轨道，通常由单级或多级组成，每级包含箭体结构、推进系统等关键部件。起源于军用，现代运载火箭正向商业化和军民融合转型。关键技术指标包括运载能力、入轨精度、可靠性和发射成本。火箭结构设计、能源供应和技术水平共同决定了这些指标。多级串联是主流结构形式，各级火箭通过分离推进有效载荷。化学火箭是主要动力来源，液体火箭因其推力大、可控性高在航天领域占主导地位，而固体火箭则以其简单、成本低在小卫星和军事领域广泛应用。
- 液体火箭技术以其高效、可回收的发动机设计，成为商业航天领域的核心技术：**液火发动机作为火箭的“心脏”，由推力室、涡轮泵等复杂组件构成，其研制关键在于推力室的燃烧稳定性和涡轮泵的高效率。液体火箭发动机的工作机理涉及推进剂的化学能转化为推力，其性能参数包括推力、比冲和混合比，直接影响火箭的运载能力和效率。通过优化推进剂选择、循环方式、以及应用先进技术如3D打印和动态密封，液体火箭发动机的性能和可靠性得到显著提升。此外，创新的喷注器设计和冷却技术进一步提高了发动机的推力和适应性，而箭体结构和控制系统的优化则确保了火箭的整体稳定性和可靠性。
- 可回收火箭技术是航天领域的重要发展方向，对降低发射成本具有关键作用：**火箭发动机作为成本的主要部分，其重复使用技术尤为重要。在一次性火箭中，发动机成本占比高达54.3%，而其他硬件设备成本相对较低。通过实现火箭的可回收性，可以显著提高硬件设备的使用效率，将高昂的硬件成本分摊到更多的发射次数上，从而降低单次发射成本。火箭的可回收性要求在设计时就必须考虑到发动机推力的灵活调节、精确的制导控制、优化的气动外形、高效的热防护以及快速的检测与维护流程。这些技术集成应用，为火箭的可复用性提供了强有力的支持。尽管目前完全重复使用火箭的技术与经济限制尚存在，但业界通过先实现一级火箭的重复使用，为未来的技术进步和成本进一步降低奠定了基础。随着技术的不断革新，预计未来火箭的单次发射成本将实现更大幅度的降低。
- 投资建议：**我国航天产业已进入发展“快车道”，卫星互联网等新兴星座的建设、大运力低成本趋势正引领商业航天开启新时代。我国航天产业快速发展也对我国火箭发射能力提出更高的要求，低成本、大运力已成为运载火箭的发展趋势。建议关注以下标的：上游原材料及元器件：斯瑞新材、宝钛股份、钢研高纳、中航高科、铂力特、华曙高科、航天电子、航天电器、高华科技。测试：西测测试、苏试试验、思科瑞。
- 风险提示：**1) 火箭研制进度不及预期；2) 资金支持不及预期；3) 地面设施和运营服务建设不及预期；4) 我国商业航天发展速度不及预期。

行业走势



相关研究

《下游需求有望回暖，持续关注行业各环节投资机会》

2024-06-11

《我国首个液体通用型发射工位竣工，商业化基础设施升级提速》

2024-06-11

内容目录

1. 运载火箭是实现航天飞行的运载工具	4
1.1. 运载火箭起源于军用背景，逐渐向商业化和军民融合方向发展.....	4
2. 液体火箭引领商业航天技术前沿	7
2.1. 液体火箭动力系统的先进设计.....	8
2.2. 液体火箭的实用箭体结构和控制系统.....	12
3. 可回收火箭是发射降本的关键，航天领域重要发展方向	17
3.1. 发动机是火箭成本的主要部分，其重复使用技术对发射降本至关重要.....	17
3.2. 先一级重复使用后完全重复使用、多种回收方式并存.....	18
4. 投资建议	21
5. 风险提示	21

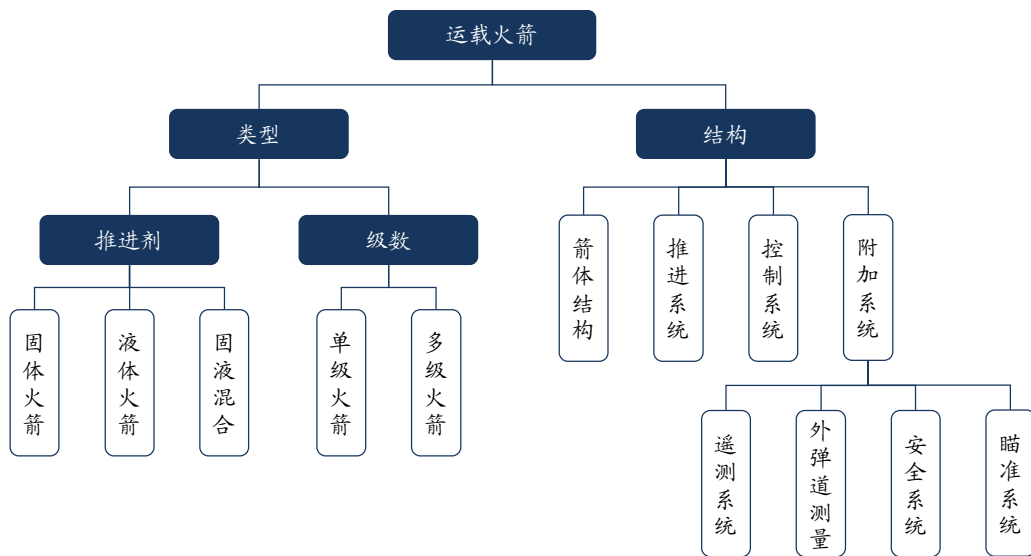
图表目录

图 1: 运载火箭类型与组成.....	4
图 2: V2 火箭被认为是现代火箭技术的鼻祖.....	5
图 3: 星舰是目前全球最大的火箭.....	5
图 4: 火箭结构示意图.....	6
图 5: 液体火箭发动机典型结构.....	7
图 6: 液体火箭发动机工作机理.....	8
图 7: 早期液氢发动机的高压涡轮叶片.....	8
图 8: 现代液体火箭发动机燃料泵.....	8
图 9: “猛禽”二代发动机原理图.....	10
图 10: “天鹊-12”甲烷发动机涡轮泵.....	10
图 11: 阿波罗下降级发动机-针栓式喷注器.....	11
图 12: 火箭控制系统组成框图.....	12
图 13: “星舰”贮箱质量占比约 90%.....	13
图 14: 长征五号火箭整流罩.....	13
图 15: 星舰采用不锈钢箭体.....	14
图 16: 三冗余飞控软件数字仿真平台的总体设计示意图.....	15
图 17: 激光雷达测量系统.....	15
图 18: 朱雀二号泵后摇摆试车.....	16
图 19: 火箭的硬件设备在总成本中占有相当大的比例，而推进剂成本相对较低.....	17
图 20: 猎鹰-9 火箭一级回收飞行剖面.....	18
表 1: 固体火箭与液体火箭对比.....	6
表 2: 比冲大、成本低的甲烷燃料崭露头角.....	9
表 3: 火箭燃烧室和喷管冷却技术.....	11
表 4: 猎鹰 9 成本构成及占比.....	18
表 5: 可复用火箭关键技术.....	19
表 6: 火箭可回收未来发展趋势.....	20

1. 运载火箭是实现航天飞行的运载工具

火箭是航天运输的主要工具，依靠火箭发动机喷射工质产生的反作用力向前推进。按照火箭用途分类主要包含运载火箭及探空火箭两种。在航天产业中得到较多应用的是运载火箭，运载火箭是能够将人造卫星、载人飞船、空间站或空间探测器等有效载荷送入预定轨道的航天运输工具，由单级或多级火箭组成。每级部组件都包括箭体结构、推进系统、控制系统、飞行测量及安全系统、附加系统等。

图1: 运载火箭类型与组成



数据来源：国家航天局，东吴证券研究所

1.1. 运载火箭起源于军用背景，逐渐向商业化和军民融合方向发展

运载火箭起源于近代军用，商业化和军民两用是现代大势所趋。运载火箭是一种航天运载工具，依靠火箭发动机产生的反作用推力，将人造卫星、载人飞船、空间站或空间探测器等有效载荷送入预定轨道。上世纪 50 年代末，为适用冷战时期太空竞赛的需求，发达国家在战略导弹的基础上发展出运载火箭，最初用于发射官方和军用的有效载荷。随着现代火箭技术的成熟，以及有效载荷日趋军民两用，越来越多国家的火箭产业开始走向商业化。

图2: V2 火箭被认为是现代火箭技术的鼻祖



数据来源: Spacepedia, 东吴证券研究所

图3: 星舰是目前全球最大的火箭

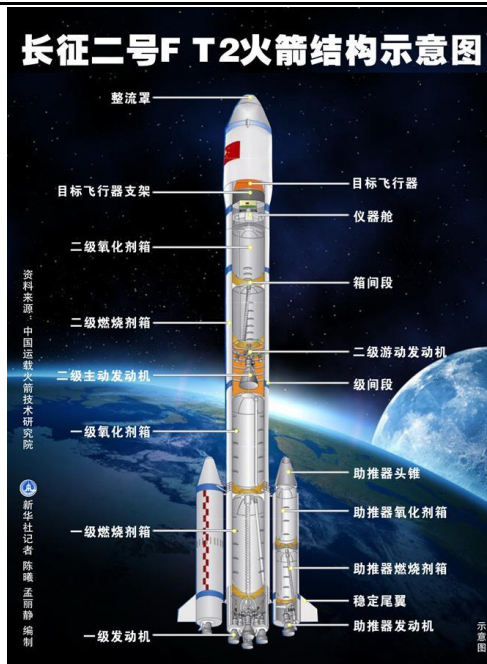


数据来源: Space, 东吴证券研究所

运载火箭的关键技术指标包括运载能力、入轨精度和可靠性,商业运载火箭对发射成本提出了更高要求。火箭的运载能力具体指有效载荷的质量,这决定了它航天舞台的上限;入轨精度则与火箭的控制系统和控制方法密切相关;发射成本取决于所使用的火箭材料、发动机燃料以及可回收和可复用技术。总而言之,运载火箭的各项指标是由火箭的结构设计、工程线路、能源供应、技术路线等诸多因素耦合后决定的。

火箭结构形式和组成较灵活,多级串联是目前主流。结构形式上,运载火箭通常由2-4多级火箭串联构成,也可并联捆绑助推器,以实现宇宙飞行所必需的宇宙速度。结构组成上,火箭主要由箭体结构、动力系统、控制系统等构成,前两项为每级火箭所固有。监测控制系统主要位于火箭末级的仪器舱内,卫星等有效载荷装在仪器舱之上,外覆整流罩。在发射过程中,火箭一子级(芯级)在点火后率先开始工作,随后与整个火箭分离,再由二子级继续将有效载荷推向太空,依次类推。卫星送轨任务完成后,火箭末级将在轨漂泊并坠落烧毁。

图4：火箭结构示意图



数据来源：中国运载火箭技术研究院，东吴证券研究所

火箭推进剂可用能源多样，化学火箭居首，液体火箭备受运载领域青睐。化学动力是航天飞行的传统动力。化学火箭根据推进剂的形态可进一步划分为固体火箭和液体火箭。固体和液体火箭在箭体结构和动力系统方面大相径庭，原因是工作机理不同：液体推进剂平时储存在贮箱内，工作时再输送进发动机燃烧室；而固体推进剂原本就贮存在燃烧室，无需贮箱和输送系统。尽管液体火箭技术复杂、成本较高，但其具备推力大、运载能力强、可控性高等优点，更适用于航天运载火箭领域。固体火箭则凭借储存时间长、准备周期短、结构简单/成本低等优点，普遍应用在小卫星运载和导弹军事火箭领域。

表1：固体火箭与液体火箭对比

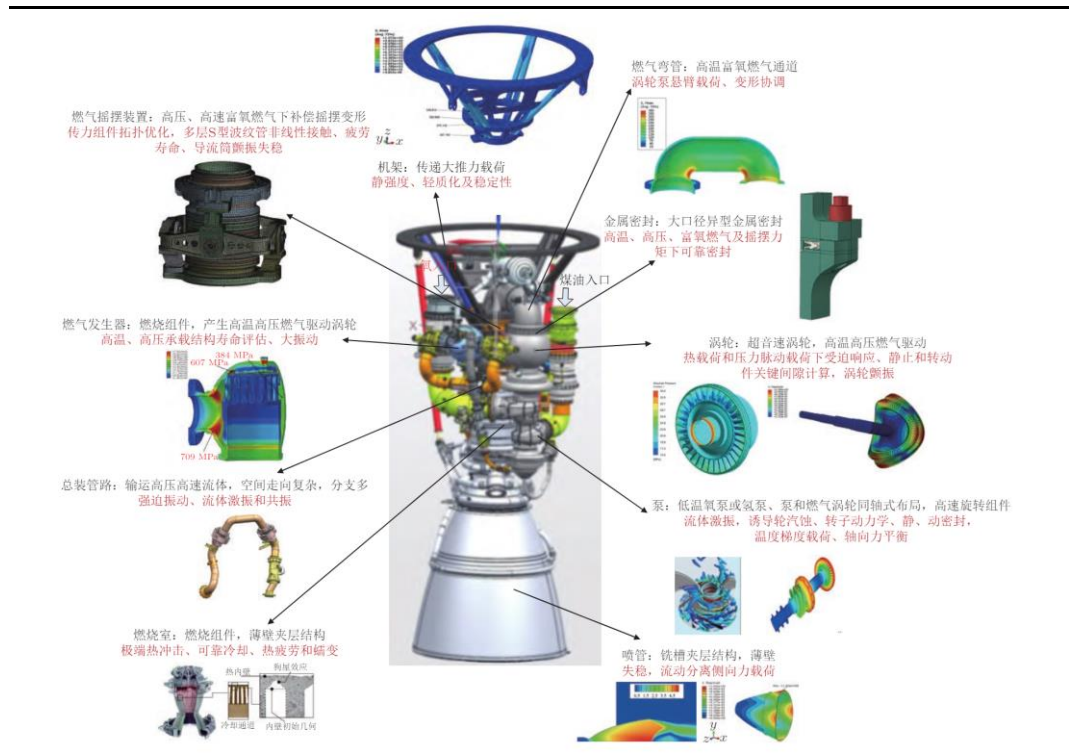
	固体火箭	液体火箭
动力系统结构	发动机(推进剂药柱、燃烧室壳体、喷管和点火装置)	推进剂贮箱 + 发动机(推力室、推进剂输送系统和发动机控制系统)
燃料成本	成本高，且剧毒、污染	成本低，且绿色、环保
结构成本	成本低；无需贮箱和输送系统	成本高；需贮箱，输送系统复杂
准备周期	周期短，一天之内；推进剂预先混合好储存在贮箱，发射前只需简单测试	周期长，20天左右；推进剂需低温贮存，使用时加注，发射前需多轮测试
运载能力	弱	强
可控性	低；点火后只能等待燃料耗尽	高；可通过阀门控制关机和重启
回收适性	不适合	适合
综合规模成本	高	低
适用领域	小卫星运载；军事导弹	低成本大规模运载

数据来源：国家航天局，东吴证券研究所

2. 液体火箭引领商业航天技术前沿

动力系统是液体运载火箭极为重要的组成系统，发动机被誉为火箭的“心脏”。相比固体火箭，液体火箭凭借其发动机在高运力和可回收前景方面带来的成本优势，更加适合未来商业航天运载的应用场景。液体火箭发动机在结构上更为复杂，组部件数量更多，主要由推力室、涡轮泵、燃气发生器（或预燃室）、火药启动器和各种阀门、调节器、管路等组成。

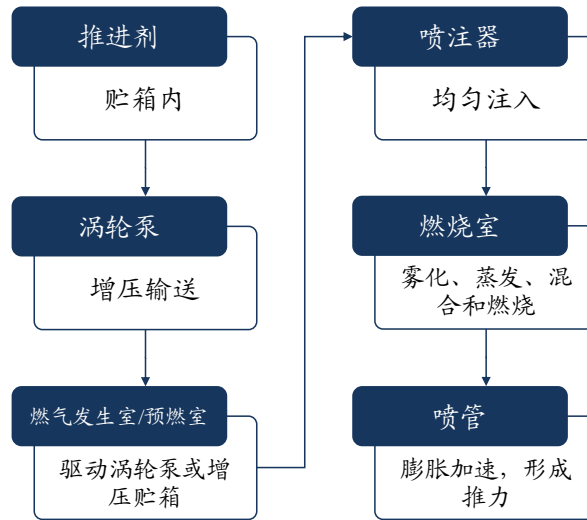
图5：液体火箭发动机典型结构



数据来源：《大推力液体火箭发动机结构中的力学问题》，东吴证券研究所

推力室和涡轮泵是液体发动机研制过程的关键。1) 结构上进一步细拆：推力室由喷注器、燃烧室、喷管等构件组成；涡轮泵由气体涡轮、燃料泵、氧化剂泵等构件组成。推力室的研制难点在于保证燃烧的稳定性和对喷注器和喷管型面的设计提出了较高要求，需要尽可能地满足尺寸小、重量轻、耐高温等条件。涡轮泵的研制难点在于如何在苛刻的工作条件下保证高转速和高效率，这牵涉到包含轴承、密封、叶型、诱导轮在内的多方面综合设计。2) 工作机理上分析：推力室是将推进剂的化学能最终转变成推进力的重要组件，涡轮泵是推进剂输送系统的重要组件。在液体发动机的作业过程中，首先由涡轮带动泵实现对贮箱的增压，通过不同类型的循环方式，将贮箱内的推进剂沿管路送入推力室。推进剂先由喷注器按一定的流量喷入燃烧室，经雾化、蒸发、混合和燃烧生成高温高压气态产物，再通过喷管膨胀加速，将热能转变为动能，向外喷出形成反作用推力。

图6：液体火箭发动机工作机理



数据来源：国家航天局，东吴证券研究所

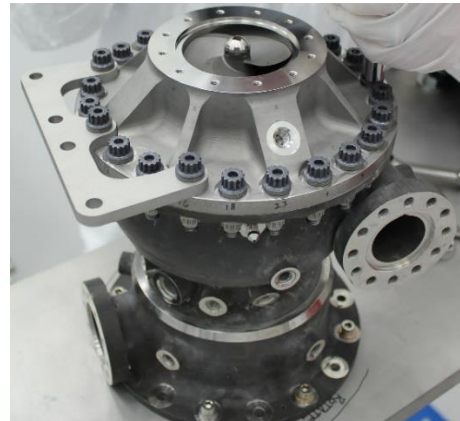
液体火箭发动机的关键性能参数包括推力、比冲和混合比。1) 推力用于衡量发动机的工作能力大小。根据不同的大气压力条件，每台发动机都有三种推力表示形式：海平面推力、地面推力、真空推力。2) 比冲指单位推进剂流量产生的推力，用于衡量发动机的性能。比冲越大，发动机效率越高。3) 混合比指氧化剂与燃料的质量流量之比。发动机在多次性能试车后可计算得到混合比偏差，减小混合比偏差能够有效提高火箭运载能力。总而言之，发动机的实际工作过程极其复杂，它的性能由技术、材料、设计上的诸多因素综合决定，最终被具象表示为参数。

图7：早期液氢发动机的高压涡轮叶片



数据来源：NASA，东吴证券研究所

图8：现代液体火箭发动机燃料泵



数据来源：NASA，东吴证券研究所

2.1. 液体火箭动力系统的先进设计

火箭动力系统设计前需要选择推进剂，出于供应和成本角度的考虑，液氧/甲烷是商业液体火箭未来星际探索的有力保障。推进剂是发动机的“血液”，它的搭配方式灵活多样。目前液体火箭的推进剂普遍采用氧化剂+燃料的双组元形式，备选燃料主要有煤油、甲烷、液氢。发动机的比冲越大，完成相同工作量所需的燃料就越少，效率和

能耗成本也就更优化。尽管液氢燃料发动机的比冲最大，但密度比冲最低，这意味着液氢的贮箱体积更大，导致火箭的运载能力降低。甲烷发动机比冲次之，但密度比冲大幅缩小。因此，**甲烷燃料成为了一个折中的方案**。此外，选用甲烷燃料的成本极低，仅为液氢的百分之一。另外，甲烷制备相对容易，方便在外星球就地取材，并且不会产生积碳问题，使发动机具备良好的回收适性。商业航天公司研制的液体火箭发动机一般选择从技术成熟的煤油燃料入手。目前，国内的蓝箭和星际荣耀已积极开展甲烷发动机的研制。23年7月，蓝箭公司搭载天鹊-12液氧/甲烷发动机的朱雀二号火箭发射成功，这是全球首枚成功入轨的液氧甲烷火箭，对我国商业火箭事业意义重大。

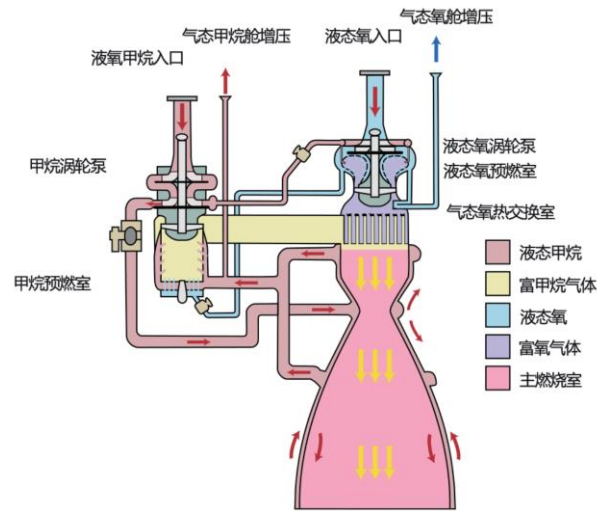
表2：比冲大、成本低的甲烷燃料崭露头角

	单位	液氧/煤油	液氧/甲烷	液氧/液氢
氧化剂密度	g/L	1141	1141	1141
燃料密度	g/L	813	422	70
混合比	/	2.7 : 1	3.7 : 1	6 : 1
单升液氧对应燃料	L	1 : 0.52	1 : 0.73	1 : 2.7
理论最大比冲	s	370	459	532
燃烧温度	K	3670	3550	3070
沸点	K	490	111	20
成本		较低	低	高
设计难度		成熟	较大	大
积碳问题		√	×	×
环保性		√	√	√
火星可得性		×	√	√

数据来源：Everyday Astronaut，东吴证券研究所

发动机设计首先从循环方式的设计开始，**全流量分级燃烧是目前火箭推进剂利用效率最高的循环方式**。循环方式，即发动机的推进剂输送系统，在性能考量方面并不存在绝对最优的选项，因此循环方式的设计通常需要在性能之间做出取舍。按技术难度梯度进行大类排序，可以简单理解为“泵压式>挤压式”、“闭式>开式”。当前液体运载火箭的主流循环方式选择是分级燃烧循环和燃气发生器循环，而**代表最先进技术的循环方式是全流量分级燃烧循环，这也是分级燃烧的一种**，由SpaceX的猛禽发动机率先实现量产并投入使用。猛禽发动机以其推力最大、效率最高、可复用低成本优势闻名。

图9：“猛禽”二代发动机原理图



数据来源：《“超重-星舰”的“猛禽”发动机》，东吴证券研究所

涡轮泵是发动机唯一的高速旋转组件，3D 打印、动态密封等新型先进技术时常得到应用。发动机被誉为火箭的“心脏”，而涡轮泵又是发动机的“心脏”。相较于其他组件，火箭研制公司通常对涡轮泵做更多的信息保密工作。1) 金属 3D 打印/增材制造技术在火箭发动机上的应用前景越发广阔。使用 3D 打印技术能够保障零件质量性能、降低成本、提高制造效率，尤其在涡轮泵零件上目前已经有了较多实际用例。2) 可靠的涡轮泵离不开动态密封技术的支持。动态密封件充当涡轮机高温供气和泵侧低温液氧之间的物理隔离，起到防止推进剂泄漏、防止污染物进入以及控制压力的作用。一些改良的动态密封件还可以进一步补偿涡轮机产生的轴向力。3) 近年来我国运载火箭事业在液体发动机的涡轮泵设计上实现重大突破。例如蓝箭航天的天鹊-12 发动机应用了刚轴、浮动环动密封、轴向力平衡系统等关键技术，有力地提高了涡轮泵的性能和可靠性。

图10：“天鹊-12” 甲烷发动机涡轮泵

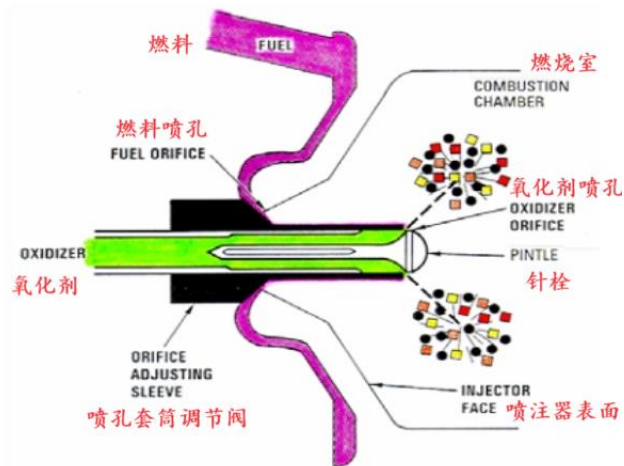


数据来源：蓝箭航天，东吴证券研究所

针栓式设计是喷注器设计的创新突破，也是液体发动机实现深度变推力的核心技术

之一。喷注器是推力室的起点，是用来将燃料和氧化剂以特定比例均匀地注入燃烧室的基本组件，对发动机的稳定性起到关键作用。**传统喷注器设计主要分为直流式和离心式两种。**直流式结构简单，其中的双股自击式喷注器较好地兼顾了性能和稳定性，被广泛用于大推力发动机；离心式结构较复杂，过去常用于俄罗斯的火箭发动机。**相较于传统喷注器，针栓式喷注器在设计上更加简化**，既大幅降低了生产成本、提高了节流能力，还能提供稳定的高燃烧效率，满足可回收运载火箭可以大范围调节推力的要求。针栓喷注技术最早被应用在美国登月的下降级发动机上，随后被 SpaceX 公司首次应用到旗下运载火箭发动机“梅林-1A”上，为其后续火箭回收技术提供坚实基础。

图11: 阿波罗下降级发动机-针栓式喷注器

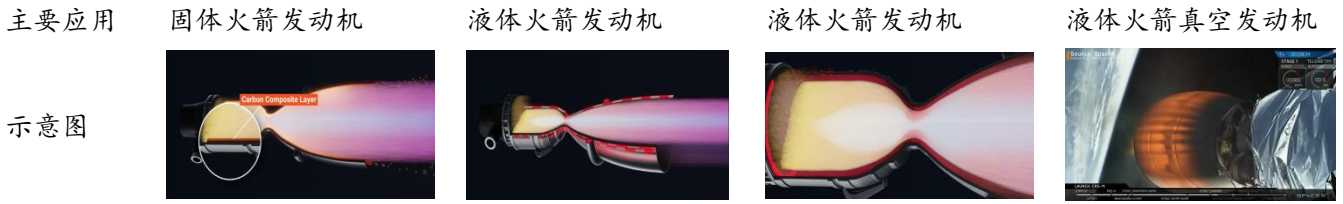


数据来源:《Summary of Deep Throttling Rocket Engines with Emphasis on Apollo LMDE》, 东吴证券研究所

薄膜冷却、辐射冷却。烧蚀冷却技术过去常用于固体火箭；此外，SpaceX 的猎鹰 1 号液体火箭在前两次试飞中也使用了烧蚀冷却，但随后马斯克承认其在设计上的失败，并将梅林发动机升级为再生冷却设计。**再生冷却技术是一项重大突破**，它能够使液体火箭发动机的推力室在更高的温度和压力下工作，从而提供更大的推力。再生冷却在提高可靠性的同时也有利于发动机的重复使用，因此逐渐成为液体火箭的普遍选择。

表3: 火箭燃烧室和喷管冷却技术

	烧蚀冷却	再生冷却	薄膜冷却	辐射冷却
工作原理	燃烧室和喷管的壁内有一层碳复合材料充当烧蚀层，燃烧时碳层升华吸收热量	在燃烧室和喷管的壁中切割出小通道，用高导热的铜或镍合金密封，低温推进剂流过后吸收热量	将更多燃料从喷注器外周注入燃烧室，靠近腔壁的燃料因缺乏氧化剂而形成不燃绝缘层，起到隔热作用	喷管延伸段由超薄钨合金制成；发动机在通电时，金属将热量辐射到太空
优点	最简单有效	发动机可重复使用	方便将煤油等碳基燃料产生的废气用于喷管下部气膜冷却	喷管能承受更高热量
弊端	发动机使用前无法进行全面测试；发动机不能重复使用	技术难度大，因为前提要保证喷注器具有比燃烧室更高的压力	技术难度大，因为前提要保证泵入废气的压力比燃烧室更大	喷管较脆弱；仅限真空环境

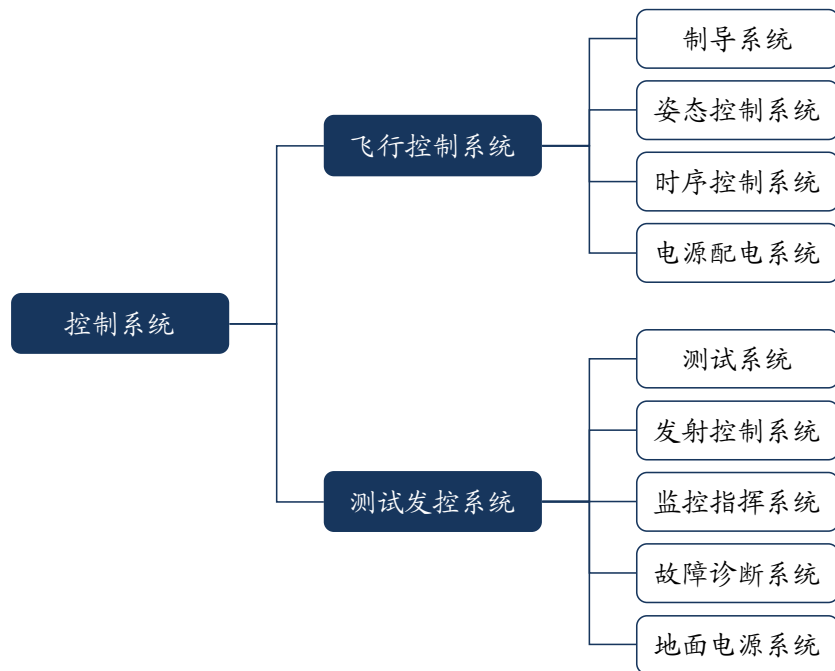


数据来源：Everyday Astronaut，东吴证券研究所

2.2. 液体火箭的实用箭体结构和控制系统

箭体结构和控制系统同样对运载火箭的稳定性和可靠性提供有效支持，前者是火箭的基体，后者是火箭的“大脑”。液体火箭的箭体主要由推进剂贮箱、仪器舱、推力结构、尾翼、整流罩等组件组成，在设计上尽可能的要求结构简单、气动外形良好、强度高、质量轻、成本合理。火箭的控制系统构成复杂，通俗来讲有导航、制导、控制三个功能：导航负责知晓位置，制导负责知晓目的地和轨迹，控制负责改变飞行姿态和跟踪制导到达轨道。

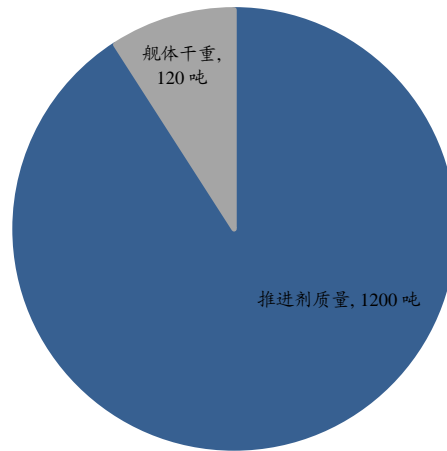
图12：火箭控制系统组成框图



数据来源：《火箭控制系统组成框图》，东吴证券研究所

推进剂贮箱是液体运载火箭质量占比最大的箭体部组件，共底贮箱设计可减轻火箭质量，从而提升运载能力。贮箱对密封和焊接工艺要求较高，通常由铝合金制成。它不仅用来存贮推进剂，也是箭体承力结构的一部分。数量上贮箱一般有两个，分别装氧化剂和燃料，总重量占箭体的60%以上；而“二合一”的共底贮箱设计可以缩短火箭长度，助力火箭减重增效，被誉为低温液体火箭“皇冠上的明珠”。目前国内的星际荣耀公司已经在可复用无绝热层共底贮箱的研制上率先实现了突破，单层共底贮箱可有效减轻200kg以上的重量。

图13: “星舰”贮箱质量占比约 90%



数据来源: Human Mars, 东吴证券研究所

整流罩是火箭末级有效载荷的保护装置,要求质量轻、高可靠、耐高温以及易透波。运载火箭穿过大气层时,整流罩会为有效载荷提供保护;飞出大气层后,整流罩会被抛掉以减轻火箭质量。整流罩常采用蜂窝结构,包括面板和蜂窝夹层两部分材料,面板一般为纤维复合材料,蜂窝夹层一般为铝合金、玻璃钢、碳纤维等。整流罩需具备良好的宽频透波功能,目前国外火箭整流罩大多选用石英纤维复合材料制成。国内整流罩使用蜂窝夹层复合材料制造的技术较成熟,但在纤维复合材料的制造工艺方面尚有欠缺,正在奋力追赶国际第一梯队。

图14: 长征五号火箭整流罩



数据来源: 中国载人航天, 东吴证券研究所

火箭壳体常采用铝合金材料,不锈钢材料因其高可靠性和超低成本越来越受到商业航天企业的关注。常见的箭体外壳材料包括碳纤维、铝锂合金、不锈钢等。相比碳复合

材料和硅隔热瓦，不锈钢更具弹性，不会直接破碎或者脱落；相比铝合金，不锈钢的熔点更高，从而具备更好的耐热性。强度方面，碳纤维在一般环境下胜出，不锈钢则在低温环境下更佳；成本造价方面，不锈钢的优势更加凸显，其单位价格仅为铝合金的十分之一，碳纤维的六十分之一；在其他方面，不锈钢的锻造和焊接工艺更加简单，但也会使箭体质量增加，降低运载能力。在性能和价格的权衡下，SpaceX、蓝箭等商业航天公司纷纷在下一代火箭壳体的设计中采用不锈钢材料。

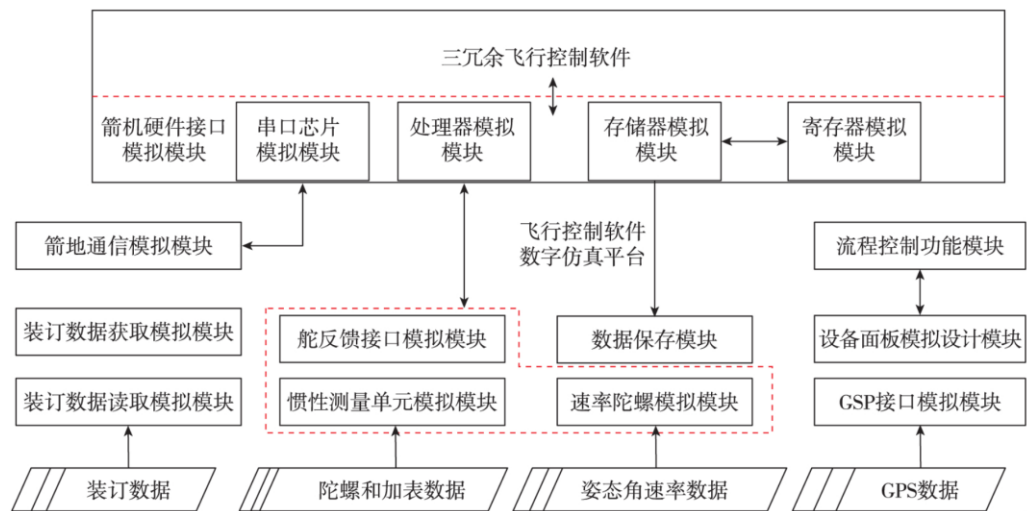
图15：星舰采用不锈钢箭体



数据来源：中国数字科技馆，东吴证券研究所

从“以质取胜”到“以量取胜”——运载火箭控制系统中的冗余设计是可靠性要求最高、结构最复杂的系统。为了提升火箭系统的可靠性，当精细化设计和质量控制发展到瓶颈时，就需要通过投入冗余资源的方式来换取可靠性。冗余设计要遵循适度原则，而非多多益善。例如，欧航局阿丽亚娜 5 号的电子系统采用完全备份的双冗余设计，SpaceX 的猎鹰 9 号则采用三冗余容错架构。具体而言，猎鹰 9 号火箭共有 10 个发动机，每个发动机均超额地装配 3 台飞行计算机，共计 30 台。此外，猎鹰 9 的电气系统还会配备多个冗余锂离子电池，以减少电气接口的复杂性。冗余设计使火箭在部分设备故障时仍然能保持正常工作，大幅提高了火箭飞行的容错率。

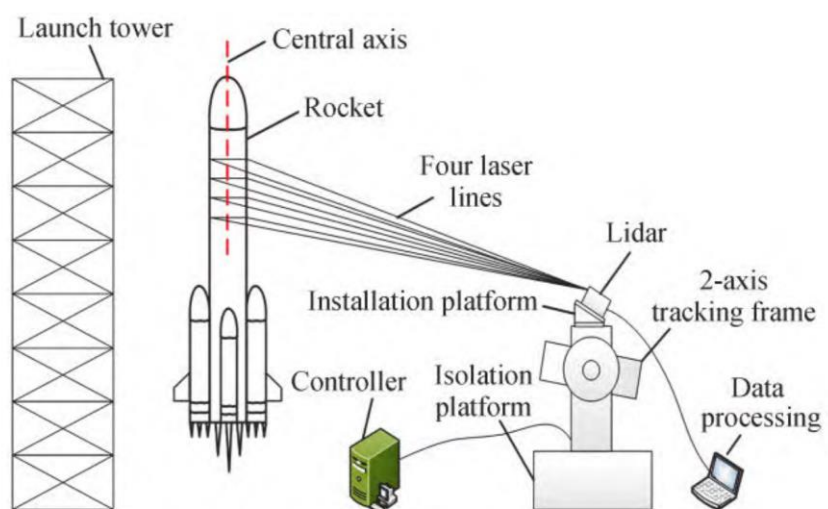
图16: 三冗余飞控软件数字仿真平台的总体设计示意图



数据来源:《运载火箭三冗余飞行控制软件的数字仿真设计》, 东吴证券研究所

火箭的跟踪测量是安全控制和姿态控制的前提, 运载火箭跟踪测轨的基本方式是光学跟踪测量和无线电跟踪测量。跟踪测轨系统负责提供火箭的位置运动参数。光学跟踪测量是最基本的测量方法, 它实际是一个具有随动机座的大型望远镜, 常见设备是电影经纬仪, 该设备简单有效, 但无法全天候工作。无线电跟踪测量, 即用雷达测量, 它基于无线电波在空间的传播进行测量, 工作原理是: 地面的脉冲雷达向运载火箭发送询问信号, 火箭上的应答机接收信号并转发到地面站, 然后基于延迟时间和多普勒频移来测算火箭距离和速度。相比光学测量, 雷达测量具备高精度、作用距离远、全天时、高分辨率和不易受环境干扰等优点。实践中, 跟踪测轨系统还会和遥测、惯性导航等系统一起提供参数信息, 再交由计算机作出控制决策和指令。

图17: 激光雷达测量系统

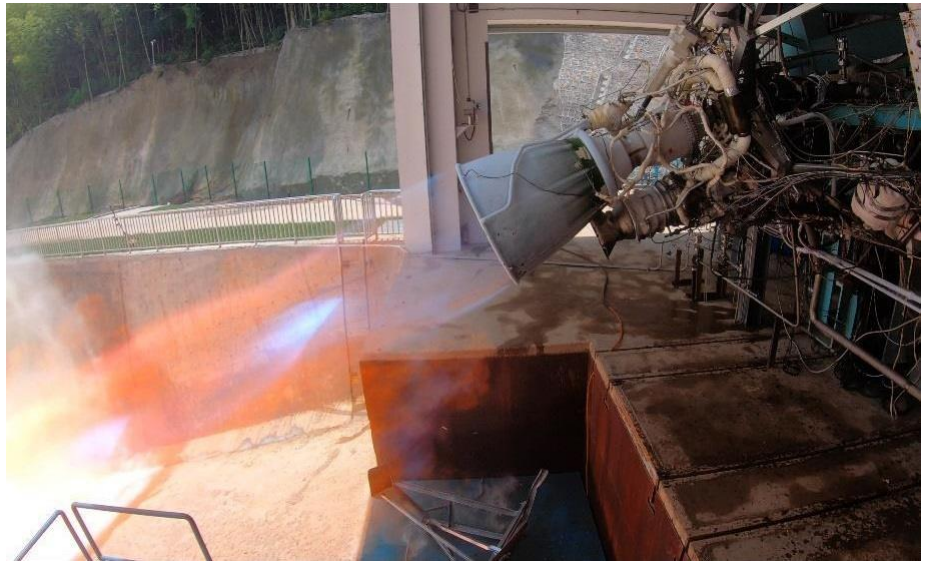


数据来源:《基于激光雷达的火箭垂直起飞段姿态测量技术》, 东吴证券研究所

液体火箭的姿态控制离不开发动机推力矢量控制的支持, 机电伺服泵后摇摆技术有助于实现火箭姿态稳定和高精度控制。作为火箭姿态控制的一部分, 推力矢量控制的主

流思路是主发动机直接摇摆改变方向，这涉及泵前和泵后摇摆两种方式：泵前摇摆指涡轮泵和推力室一起摇摆；泵后摇摆指涡轮泵固定，仅推力室摇摆。伺服的字面意思是按照命令办事，机电伺服就是一种电子矢量控制方法，它通过接收电信号指令来实现精准的机械跟随动作。大功率机电伺服泵后摇摆是一项新技术，它的设计更复杂，相应也具备更多优点，包括减小发动机尺寸和重量、降低摇摆力矩、提高涡轮泵性能等等。目前，SpaceX、蓝箭、航天四院等国内外火箭发动机研制主体都相继开发出先进的机电伺服、泵后摇摆技术。

图18：朱雀二号泵后摇摆试车



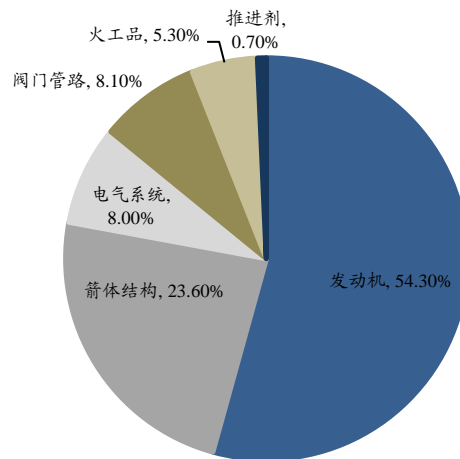
数据来源：澎湃，东吴证券研究所

3. 可回收火箭是发射降本的关键，航天领域重要发展方向

3.1. 发动机是火箭成本的主要部分，其重复使用技术对发射降本至关重要

火箭发动机价值量占比过半，发动机能否满足重复使用是技术路径选择的重要考量。火箭的成本结构中，一二级火箭的硬件设备，尤其是发动机，占据了成本的绝大部分，而推进剂成本相对较低。发动机作为火箭中价值最高且技术要求最严格的部分，其能否实现重复使用，是决定火箭回收和降低发射成本的关键因素。在一次性使用的火箭中，发动机成本占比高达 54.3%，而箭体结构、电气系统、阀门管路及执行机构、火工品等其他部分的成本占比相对较小。火箭回收和重复使用已成为降低成本的必然选择，通过实现火箭的可回收性，可以显著提高硬件设备的使用效率，将高昂的硬件成本分摊到更多的发射次数上，从而显著降低单次发射的成本。

图19：火箭的硬件设备在总成本中占有相当大的比例，而推进剂成本相对较低



数据来源：澎湃，东吴证券研究所

复用技术带来成本节约，猎鹰9通过回收实现单次降本70%。SpaceX的猎鹰9火箭通过采用可回收技术，在发射服务定价上实现显著的成本节约。复用型火箭的发射服务价格约为5000万美元，通过一次新箭发射加一次复用型火箭发射，SpaceX能够实现4700万美元的利润，这接近一枚新火箭的制造成本，且超过3次复用火箭的边际成本。猎鹰9火箭在执行12次发射任务时，累计载荷能力为720%，而累计成本仅为440%，意味着执行12次任务能节省的成本接近3枚全新火箭或93枚复用火箭的成本。SpaceX的回收技术使单次发射成本降低70%，验证了可回收降本路径的有效性。随着SpaceX不断探索火箭二级的可回收技术，预计未来火箭的单次发射成本将进一步降低。

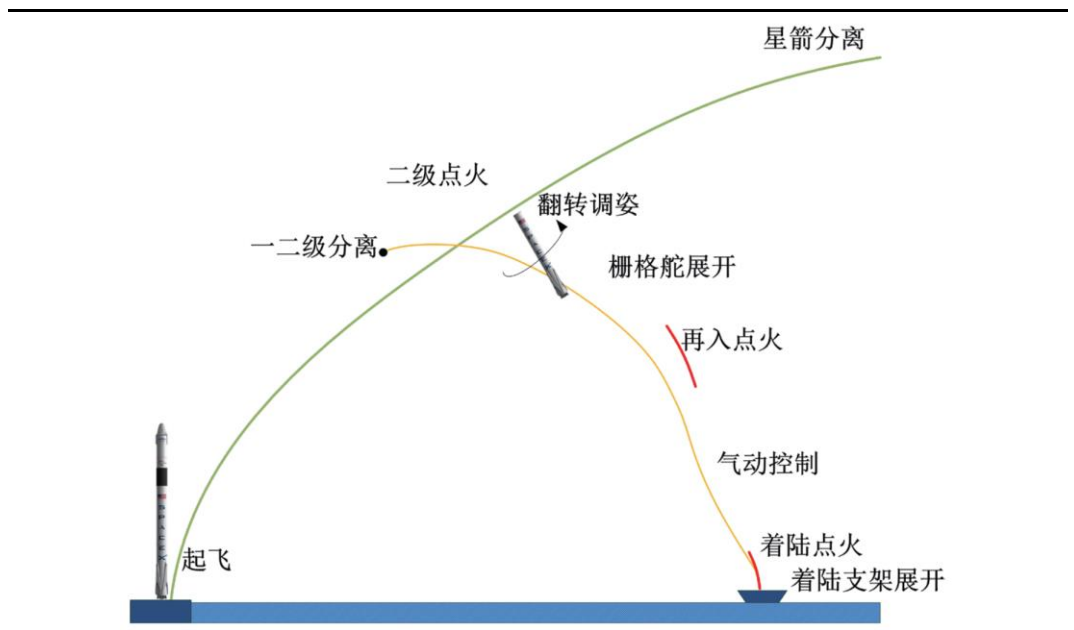
表4: 猎鹰9成本构成及占比

猎鹰9火箭		全新火箭成本 (万美元)	复用火箭成本 (万美元)
硬件	一级	3000	-
	二级	1000	1000
	整流罩	500	-
软件	推进剂	40	40
	发射测控、翻修等相关费用	460	460
总计		5000	1500

数据来源:《“猎鹰”9火箭的发射成本与价格策略分析》, 东吴证券研究所

猎鹰系列运载火箭已实现了部分重复使用技术。猎鹰-9火箭是中型两级火箭, 具有70米长、3.66米直径和549吨起飞质量, 使用液氧/煤油作为推进剂, 能够将22.8吨载荷送入近地轨道。该火箭一级具备垂直降落回收能力, 可重复使用最多10次。猎鹰重型火箭继承了猎鹰-9的技术, 采用3个并联芯级, 起飞质量达1420.8吨, 是目前运载能力最大的现役火箭, 具有96%的发动机复用率。自2015年12月至2020年11月, SpaceX已成功回收60余次火箭一级, 并实现了整流罩的回收和重复使用。

图20: 猎鹰-9火箭一级回收飞行剖面



数据来源:《美国重复使用运载火箭发展分析》, 东吴证券研究所

3.2. 先一级重复使用后完全重复使用、多种回收方式并存

重复使用运载火箭涉及到发动机深度推力调节、高精度制导控制等关键技术。可复用火箭技术的核心在于实现发动机推力的灵活调节、精确的制导控制、优化的气动外形设计、高效的热防护措施以及快速的检测与维护流程。这些技术确保火箭能够安全返回并快速准备再次发射, 有效降低成本, 提高发射效率。例如, SpaceX的“猎鹰”系列通

过其 Merlin 发动机的推力调节能力和在线凸优化制导技术，实现了火箭的垂直着陆。同时，“星舰”的气动外形经过多轮优化，增强了飞行控制能力。快速的检测与维护流程，如改进的着陆支架设计和健康管理理念，进一步缩短了火箭的再次发射准备时间。这些技术的集成应用，为火箭的可复用性提供了强有力的支持。

表5: 可复用火箭关键技术

技术	详情
火箭发动机深度推力调节技术	<ul style="list-style-type: none"> · 垂直着陆火箭需要在着陆时将速度降低到允许条件，这要求发动机能够进行大范围的推力调节 · SpaceX 的“猎鹰”系列火箭使用的“灰背隼”发动机具有 57%~100%的节流能力 · “超重 - 星舰”系统的“猛禽”发动机可实现 40%~100%的节流能力 · 蓝色起源公司的 BE-4 液氧/甲烷发动机具有 65%~100%的节流能力
返回段高精度制导与控制技术	<ul style="list-style-type: none"> · 重复使用火箭在返回过程中需要高精度的制导与控制技术以确保安全着陆 · SpaceX 的猎鹰-9 火箭采用在线凸优化制导方法，实现快速精确着陆轨迹规划
气动外形优化设计技术	<ul style="list-style-type: none"> · 火箭上安装栅格舵和 RCS，配合主发动机推力矢量控制，提供姿态稳定和控制 · 重复使用火箭需要优化气动外形以减小飞行载荷、降低气动热，并便于轨迹控制
再入热防护技术	<ul style="list-style-type: none"> · SpaceX 的“星舰”经过多次外形优化，形成前后两对翼的方案，提供更大的控制能力 · “新格伦”火箭一级外形经过改变，增加了滑翔翼，改善再入飞行环境 · 火箭在高超音速再入时需要有效的热防护措施以保护结构和设备
快速检测与维护技术	<ul style="list-style-type: none"> · SpaceX 的“星舰”使用改性不锈钢材料，并安装轻质隔热片增强热防护 · ULA 公司的“火神”火箭使用充气式防热罩保护动力舱 · 回收后的火箭需要快速检测与维护，以降低成本和提高发射周期 · SpaceX 改进设计以实现快速复位和维护，采用健康管理理念减少检测工作量 · 使用机器人提高箭体固定安全性和响应速度，缩短再次发射时间间隔

数据来源：《美国重复使用运载火箭发展分析》，东吴证券研究所

重复使用运载火箭遵循先一级重复使用后完全重复使用、多种回收方式并存但更倾向于动力垂直回收、火箭研制理念持续革新的发展途径。当前，技术与经济的现实限制使得完全重复使用火箭尚不可行，因此业界采取了先实现一级火箭重复使用的策略。一级火箭重复使用不仅能有效降低发射成本，而且为末级火箭的回收提供了技术积累。动力垂直回收因其高着陆精度和对现有设计改动小，成为中大型火箭回收的主流方式。火箭设计也在经历革新，以适应全任务剖面 and 全生命周期的需求。这包括在上升和返回段承受的复杂载荷工况、气动控制、热防护，以及多次使用的检测维护和疲劳载荷等因素。火箭设计需在满足性能的同时，兼顾可回收性和可维护性，特别是在大气层内飞行时，要优化气动外形和热防护系统，以应对更大的法向载荷和气动热效应。

表6: 火箭可回收未来发展趋势

趋势	发展方向
技术发展策略	火箭的重复使用技术发展遵循由易到难的原则, 即从部分重复使用逐步过渡到完全重复使用。当前技术条件下, 完全重复使用火箭面临诸多挑战, 而一级重复使用则更实际可行
重复使用的经济性	一级火箭费用占整体费用的 50%以上, 实现一级重复使用可以显著降低发射成本, 同时为末级火箭回收积累技术和经验
回收方式的演变	火箭回收方式经历了伞降回收、升力式回收到动力垂直回收的发展。动力垂直回收方式因其对现有火箭设计改动小、着陆精度高、适应性强等优点, 成为中大型运载火箭回收的首选方式
火箭设计的革新	为适应回收和重复使用, 火箭设计需要考虑全任务剖面 and 全生命周期, 包括上升段飞行要求、返回段的复杂载荷工况、气动控制、热防护以及多次重复使用的检测维护和疲劳载荷等因素。这要求火箭设计进行新一轮的革新
气动和热防护的挑战	对于需要回收的火箭一级, 其在大气层内飞行的速度较高, 且返回过程中需要承受一定的法向载荷和气动热效应, 这要求火箭设计在气动和热防护方面进行优化
结构和性能的平衡	在设计可回收火箭时, 需要平衡结构的复杂性和运载能力, 避免因增加回收系统而导致的运载能力损失
任务性能的优化	可回收火箭的设计应允许在更大程度上优化任务性能, 包括飞行轨迹的调节能力和着陆场的条件适应性
维护和检修的重要性	回收后的火箭需要进行检测、维护和检修, 以确保其能够安全、可靠地进行多次重复使用

数据来源:《美国重复使用运载火箭发展分析》, 东吴证券研究所

4. 投资建议

我国航天产业已进入发展“快车道”，卫星互联网等新兴星座的建设、大运力低成本趋势正引领商业航天开启新时代。我国航天产业快速发展也对我国火箭发射能力提出更高的要求，低成本、大运力已成为运载火箭的发展趋势。建议关注以下标的：**上游材料及元器件**：斯瑞新材、宝钛股份、钢研高纳、中航高科、铂力特、华曙高科、航天电子、航天电器、高华科技。**测试**：西测测试、苏试试验、思科瑞。

5. 风险提示

1) 火箭研制进度不及预期：火箭研制是一项复杂且充满挑战的工程，火箭研制进度的延误可能导致成本增加、技术问题累积和市场机会丧失，对项目和相关行业造成不利影响。此外，对于依赖于火箭发射的卫星通信、科研探测等项目，进度的延误还可能影响到合作伙伴的计划和整个行业的布局。

2) 资金支持不及预期：航天产业依赖政策支持以推动技术创新和市场竞争。若资金支持未达预期，可能引发项目延期、研发投入受限，进而影响产业链稳定性和企业竞争力。

3) 地面设施和运营服务建设不及预期：航天产业的地面设施和运营服务建设若滞后于预期，将直接影响火箭发射和卫星运行的效率与安全。同时，设施不足可能限制新技术的测试与应用，减缓产业创新步伐。

4) 我国商业航天发展速度不及预期：技术落后可能使我国在全球航天市场中失去竞争力，资金投入不足或政策支持不力，将导致研发和市场推广受阻，影响产业的持续发展，发展滞后还可能错失商业机会，影响国家经济和科技实力的提升。

免责声明

东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。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，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

在法律许可的情况下，东吴证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

东吴证券投资评级标准

投资评级基于分析师对报告发布日后 6 至 12 个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A 股市场基准为沪深 300 指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普 500 指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证 50 指数），具体如下：

公司投资评级：

- 买入：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准在 15% 以上；
- 增持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于 5% 与 15% 之间；
- 中性：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于 -5% 与 5% 之间；
- 减持：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准介于 -15% 与 -5% 之间；
- 卖出：预期未来 6 个月个股涨跌幅相对基准在 -15% 以下。

行业投资评级：

- 增持：预期未来 6 个月内，行业指数相对强于基准 5% 以上；
- 中性：预期未来 6 个月内，行业指数相对基准 -5% 与 5%；
- 减持：预期未来 6 个月内，行业指数相对弱于基准 5% 以上。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议。投资者买入或者卖出证券的决定应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

东吴证券研究所
苏州工业园区星阳街 5 号
邮政编码：215021

传真：（0512）62938527

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>