



中美可重复使用火箭工程路径比较研究

王竞研¹, 李超², 谢集潇³, 厚宇德^{1*}

1. 山西大学 科学技术史研究所, 太原 030006;

2. 云途半导体研究院(海南)有限公司, 海南 570125;

3. 云镜创新(北京)航天技术有限公司, 北京 100176

摘要: 可重复使用运载火箭是当前商业航天发射成本系统性下降的核心变量, 按公开标价估算, 其单位入轨成本已降至航天飞机时代的约 1/20。本文将可重复使用火箭视为以降本为总目标的系统工程, 对照美国由航天飞机到猎鹰九号、中国由体制积累到政策放开与市场竞争的两条工程路径, 并对垂直着陆与海上网系捕获两类一子级回收方案作技术权衡。研究表明: 技术上的重复飞行并不等于经济上的高效复用; 美国路径的关键在于机制先行, NASA 从“办航天”转向“买服务”, 再由 SpaceX 以栅格舵、着陆腿、发动机深度节流与多次启动和不锈钢箭体等工程原创完成技术整合; 中国路径的特征是积累先行, 其技术积累向产业能力的转化有赖于政策放开、民营企业成长、金融资本介入与军民融合构成的制度通道。衡量可重复使用火箭竞争力的基准应是同一硬件复飞次数、任务周转间隔与单位运力成本; 美国正迈向全箭复用与航班化舰队运营, 中国则须完成从回收验证到复飞运营、再到高频运营的跨越。

关键词: 可重复使用运载火箭; 商业航天; 垂直回收; 发射成本; 液氧甲烷发动机; 系统工程; 工程路径

中图分类号: V475.1; N945; F426.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)05-0619-20

引言

近十年来, 商业航天已发展成为全球范围内新兴的经济增长热点领域。仅 2025 年度, 我国商业航天发射任务共计 50 次, 约占全年宇航发射总次数的

54%; 全年入轨商业卫星共计 311 颗, 约占全年入轨卫星总数的 84%^[1]; 同期全球年度轨道发射任务共计 329 次, 发射规模创下历史新高。在美国市场, 发射服务能力向单一市场主体集中的趋势更为显著: 一家商业发射企业已承担全球年度入轨载荷质量的绝大部

收稿日期: 2026-08-10; **修回日期:** 2026-09-08

作者简介: 王竞研 (1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为科技史、火箭科学技术史。E-mail: 490018462@qq.com

李超 (1985—), 男, 执行院长, 研究方向为商业航天。E-mail: dna.121@hotmail.com

谢集潇 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为商业航天。E-mail: meego@spacelens.cn

*厚宇德 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为科学与技术的人文研究。E-mail: hyd630418@sina.com (通讯作者)

引用格式: 王竞研, 李超, 谢集潇, 等. 中美可重复使用火箭工程路径比较研究[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(5): 619-638. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260134. CSTR: 32282.14.JES.20260134

WANG J Y, LI C, XIE J X, et al. A Comparative Study on the Engineering Pathways of Reusable Rockets in China and the United States[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(5): 619-638. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260134. CSTR: 32282.14.JES.20260134

分, 且该部分载荷中相当比例属于企业自有低轨星座的组网载荷。本轮商业航天热潮的直接动因并非源自单一尖端技术的突破, 而是以火箭可重复使用为核心的系统性成本下降: 依据美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)测算, 航天飞机时代将载荷送入近地轨道的成本约为 54500 USD/kg, 而猎鹰九号按照公开标价与最大运力估算, 单位入轨成本已降至约 2720 USD/kg, 仅为航天飞机时代的约 1/20^[2]。需要说明的是, 上述两组数据的统计口径并不一致: 前者为包含研制投入、地面设施建设与全周期运营支出的项目全成本分摊值; 后者则是通过公开标价除以该火箭不回收构型的最大近地轨道运力计算得到的理论基准值, 并非可重复使用任务的实际单位成本——可重复使用任务需要预留返回推进剂, 火箭可用运力随之降低, 实际单位成本反而高于该理论值, 两组数据仅具备量级层面的可比性。

可重复使用技术本身并非全新的技术构想。早在 20 世纪 70 年代, 美国就已以降低航天发射成本为目标启动部分可重复使用的航天飞机项目, 项目立项阶段甚至提出可将载荷的入轨成本降至数百 USD/kg; 但该计划 1981—2011 年共 30 年、135 次飞行的运营实践表明, 技术层面可实现重复飞行与经济层面实现高效复用之间存在显著鸿沟。真正将可重复使用技术转化为成本优势的路径, 并非传统的国家航天机构主导模式, 而是在 NASA 合同体系与技术转移的基础上, 由太空探索技术公司(Space Exploration Technologies Corp., SpaceX)这类新兴商业发射企业最终完成。中国则依托自身液体火箭技术积累, 自 2014 年前后放开社会资本准入后, 历经十余年的市场竞争, 逐步探索出可重复使用运载火箭的发展路径: 2025 年底起, 朱雀三号、长征十二号甲等新型运载火箭相继完成入轨首飞并开展一子级回收验证; 截至 2026 年 8 月, 朱雀三号遥二火箭完成一子级陆上垂直着陆回收, 该任务是我国首次完成火箭一子级陆地垂直着陆回收。面对同一技术目标, 中美两国形成了差异显著的工程发展路径。因此, 全面回顾研究可重复使用运载火箭的总体脉络, 对于我国商业航天产业的健康发展, 以及全球航天产业的格局演进都具有

重要的现实意义与学术价值。

相较于一次性运载火箭, 可重复使用火箭技术的核心突破在于, 它从根本上改变了航天发射“一次发射即报废一次运载工具”的传统模式, 通过对火箭关键结构与动力系统的回收复用, 实现了发射成本的系统性下降与运营效率的大幅提升。这种技术变革不仅重构了航天发射的成本结构, 更推动了航天产业从高成本、低频次的传统模式, 向低成本、高频次的航班化运营模式转型, 为低轨巨型星座组网、天地一体化信息网络建设以及后续地月空间经济开发等新兴应用场景提供了技术支撑, 深刻改变了全球航天产业的发展逻辑。

当前, 国内外已有诸多研究围绕可重复使用火箭的技术路径、产业政策、发展历程等维度展开讨论, 但多数研究聚焦单一国家的发展历程, 或是单纯对技术指标进行对比分析, 缺乏对中美两国不同发展路径的系统性梳理与深度比较。作为当前全球商业航天领域发展最具代表性的两个国家, 中美两国在可重复使用火箭的发展过程中, 分别依托自身的技术积累、制度环境与产业基础, 走出了两条特征鲜明、逻辑清晰且差异显著的发展道路。对二者进行比较分析, 不仅能够帮助我们厘清不同路径的形成逻辑与发展优势, 更能够为我国可重复使用火箭产业后续发展提供有益的经验借鉴。基于此, 本文从可重复使用火箭的发展脉络出发, 系统梳理中美两国可重复使用火箭的发展历程, 深入比较两国工程路径的差异, 分析不同路径背后的技术、产业与制度逻辑, 以期为我国商业航天产业的高质量发展提供参考。

1 可重复使用火箭的价值与意义

1.1 可重复使用火箭的经济属性

传统一次性运载火箭将造价数亿元的精密航天运载系统作为单次任务耗材, 其发展逻辑与产业规模化的要求存在根本矛盾——正如民航产业不可能建立在“每次航班报废一架客机”的模式之上。可重复使用技术的经济本质, 是将火箭从单次任务耗材转化为可重复利用的固定资产: 通过对发动机、箭体等核心部

件进行检测维护实现重复使用, 单次发射任务仅需承担燃料、损耗件更换以及翻修人工成本; 复用次数越高, 单次任务分摊的火箭制造成本就越低。

本轮成本下降的内在机制可通过猎鹰九号的案例开展量化分析。根据 SpaceX 提交至美国证券交易委员会的招股说明书^[3], 一子级占据运载火箭整体制造成本的主要部分, 一子级复用可使单次发射任务的边际成本相对全一次性运载系统显著降低; SpaceX 明确指出, 采用已飞行助推器执行的发射任务, 其定价普遍低于传统一次性发射服务。一次性运载火箭需将制造成本最高的一子级及搭载的多台发动机随箭体抛弃, 该部分制造成本无法在后续任务中进行分摊; 若实现一子级回收复用, 其制造成本可被多次发射任务共同分摊: 2025 年猎鹰九号共执行 165 次发射任务, 其中 157 次任务采用已完成飞行的回收助推器, 仅 8 次任务使用全新一子级; SpaceX 在财务层面按 25 次飞行对一子级计提折旧, 工程层面则将 40 次飞行设定为设计复用次数。就单位载荷入轨成本而言, 招股说明书援引 NASA 数据显示, 2010 年首型猎鹰九号已将单位载荷入轨成本降至约 2700 USD/kg, 较 18500 USD/kg 的历史平均水平下降约 85%; 2018 年首型猎鹰重型进一步将该指标降至约 1400 USD/kg, 降幅约 92%^[3]。成本结构的系统性重构, 推动航天发

射服务从“定制化工品”转化为“工业化标准化产品”, 三类运载系统的对比详见表 1^[2-4]。沿着该技术方向发展, 运载火箭的功能定位将逐步向定期化、航班化的天地往返运输工具演进: SpaceX 已通过星链组网任务完成该运营模式的演示验证, 同一批一子级助推器可轮流执行高频次发射任务, 发射周转周期持续缩短; 将周转周期压缩至天级乃至单日多次, 则是星舰系统的核心发展目标。

1.2 可重复使用火箭的国家安全价值

对大多数人而言, 星际愿景与日常生活仍有距离, 但可重复使用火箭与国家安全的联系, 已经在真实的冲突中显露出来。2022 年俄乌冲突爆发后, 乌克兰地面通信设施大面积受损, 星链系统在冲突爆发数日内即开通服务; 据乌克兰数字化转型部披露, 截至 2023 年底在乌境内运行的星链终端约 4.7 万台, 支撑着前线侦察监视、火力引导与战场数据传输, 低成本无人机与无人艇由此具备了过去只有高端军用卫星通信才能支撑的远程作战能力^[5-6]。星链的战场表现背后, 正是可重复使用火箭支撑的快速发射能力: 卫星星座的部署、补网和更新都依赖高频次、低成本的发射。和平时期, 上述能力构成商业航天的核心市场竞争力; 战争状态下, 该能力即为空间基础设施的生

表 1 航天飞机、传统一次性火箭与猎鹰九号的成本与复用对比

Table 1 Cost and reuse comparison among the space shuttle, conventional expendable rockets and Falcon 9

指标	航天飞机 (1981—2011 年)	传统一次性火箭	猎鹰九号 (复用运营)
近地轨道单位成本	约 54500 USD/kg	猎鹰九号投入运营前全球平均约 18500 USD/kg	约 2720 USD/kg
单次发射成本/报价	全寿命周期摊算约 15 亿 USD	—	复用任务定价通常低于消耗型发射; 分项制造成本未公开披露
复用方式	轨道器滑翔返回、固体助推器伞降回收, 翻修周期以月计	不复用	一子级垂直回收, 检测后再次飞行
复用纪录	5 架轨道器共 135 次任务	—	2025 年 165 次任务中 157 次使用飞行过的助推器; 一子级按 40 次飞行鉴定合格、按 25 次计提折旧

注: (1) 航天飞机与猎鹰九号的单位质量成本数据引自 Harry W. Jones 的 *The Recent Large Reduction in Space Launch Cost* (NASA Ames Research Center, 2018)^[2]; 航天飞机全寿命周期成本引自 Pielke 与 Byerly 发表于 *Nature* 的核算^[4] (约 1960 亿 USD, 2010—2011 年不变美元, 共 135 次任务, 摊算约 14.5 亿 USD/次) 及 NASA 官方航天飞机决策史所载早期成本预估; 猎鹰九号成本结构、折旧年限与复用数据引自 SpaceX 向美国证券交易委员会提交的 S-1 招股说明书^[3]。取舍规则: 以一手官方成本文件与企业原始披露为基准, 媒体报道仅用于补充事件性信息, 不单独作为成本判据。(2) 表中单位成本 = 发射标价/一次性构型最大近地轨道运力, 系理论基准值, 而非复用构型任务的实测值; 且最大运力不等于典型交付质量, 实际任务鲜少满载。另需说明, 航天飞机与猎鹰九号两组数字口径并不完全一致, 前者为全负担项目成本, 后者为市场价格, 二者仅具有量级上的可比性。

存能力与快速恢复能力——终端月度战损需以同等速率完成补投, 受干扰或已损毁的星座节点需以同等速率完成替换。明晰这一战略逻辑后, 即可理解我国将商业航天列为国家重点培育的新兴增长引擎, 并于2024年首次将其纳入《政府工作报告》的决策背景^[7]。

1.3 可重复使用火箭的应用前景与长远愿景

回归和平利用维度, 可重复使用火箭的核心价值最终需落脚于实际应用层面。卫星的通信、导航、遥感(通、导、遥)能力, 正在通过更低的发射成本加速进入日常生活: 手机直连卫星让普通手机在无地面网络覆盖处也能通信, 相关服务已由在轨验证转入小规模商用部署^[8]; 高精度卫星导航支撑自动驾驶的车道级定位; 遥感星座的重访周期正由天级缩短至小时级, 为洪涝、地震、森林火灾等自然灾害提供更及时的监测预警。上述应用的发展遵循一致的底层运行逻辑: 应用场景越丰富, 市场对卫星的需求规模越大; 需求规模越大, 发射任务越密集; 发射任务越密集, 复用环节对发射成本的摊薄效应越显著; 发射成本越低, 又会进一步催生更多新型应用——可重复使用火箭正是驱动这一正向循环运转的核心枢纽。对于一个国家的产业竞争力、安全保障屏障与长远发展空间而言, 可重复使用火箭是必须掌握的基础能力; 当入轨成本降至百USD/kg量级时, 太空制造、太空旅游、月面科研站也将从远景变为可规划产业。

2 可重复使用火箭的系统工程属性

第1节的推论隐含一个前提: 成本不是某一个技术参数, 而是整个系统的涌现结果——推进剂上省下来的钱, 很容易被翻修工时与地面周转的节奏重新吃掉——从回收、检测、翻修到再次发射, 每个环节都要占用时间; 周转周期一旦拉长, 单位时间内的飞行次数随之下降, 固定成本便摊不薄, 省下的钱又被重新消耗掉。可重复使用火箭因此不是一项单纯的技术, 而是一项系统工程^[9]。若要厘清“降低成本”这一总体目标在各分系统中的落实逻辑, 需首先构建相应的分析框架: 明确各分系统如何围绕同一目标开展

协同, 又如何形成相互牵制关系。对项目成熟度的评价, 亦不应仅以回收试验成果为依据, 而需对完整技术链条的五个层级进行系统考察, 即可控返回、完整回收、状态判定与有限整修、同一硬件复飞、稳定高频运营。完好回收仅对应五个层级中的第二层级; 即便在猎鹰九号已进入第五层级发展阶段的当下, 全球范围内多数在研项目仍停留在前三层级, 星舰迄今仅完成一次超重助推器的复飞, 其上级尚未实现完整回收。

2.1 液体火箭适配可重复使用需求

可重复使用的发展目标从技术路径选型初期即引导研究方向指向液体发动机。自戈达德(Robert H. Goddard)于1926年完成全球首枚液体火箭试飞, 并通过长期实验研究奠定液体火箭技术基础以来^[10-11], 液体发动机在推力精确控制与重复使用方面的技术优势始终得以保持。

固体发动机具备结构简单、推力大、可长期贮存的特点, 但其燃烧室结构与液体发动机存在本质差异: 固体发动机燃烧室本身为药柱浇铸成型的装药壳体, 药柱兼具燃料与燃烧空间的功能, 单次工作后即消耗殆尽, 无法像液体发动机那样实现重复充填使用; 仅金属壳体可实现重复使用——航天飞机固体助推器即通过伞降海上回收、翻修后重新装药复用的路径验证了这一技术路线。但药柱浇铸完成后, 推力曲线基本固定, 难以实现推力调节与发动机关机; 加之喷管与壳体内壁经受热烧蚀后翻修工序复杂, 且推力不可调节的特性使其难以承担返回段的减速与着陆控制任务, 因此该路线难以支撑低成本可重复使用的需求。液体发动机则具备多次启动、深度节流、推力精确调节的特性, 可通过设计冗余与可检修性支撑重复使用要求; 上述特性虽提升了发动机本身的设计复杂度与研制成本, 但为箭体其余结构的重复使用提供了基础, 因此成为承载降本目标的可行技术载体。

推进剂选型同样符合经济性逻辑: 液氧煤油路线的工程基础最为成熟, 但燃烧积碳会增加翻修工作量; 液氢路线比冲较高, 但会带来贮箱体积与绝热设计的额外成本; 液氧甲烷最突出的技术优势为积碳产生量少, 便于清理与重复使用——煤油燃烧裂解产生

的积碳会附着于推力室内壁、涡轮泵与管路表面, 每次飞行后均需开展专门清理乃至拆解检修, 而甲烷含碳量低, 燃烧过程基本不结焦, 可显著减少飞行后清理工序与拆解范围; 同时甲烷密度与温度适中, 便于与液氧统筹贮箱与增压方案设计, 被认为是可重复使用场景下维护友好性最优的选择^[12-14]。

美国猎鹰九号选择技术成熟度最高的液氧煤油路线, 星舰选择面向未来应用的液氧甲烷路线, 中国则采用两条路线并行发展的方案——上述技术取舍背后遵循统一的经济性逻辑。

2.2 可重复使用火箭的系统构成

从系统构成维度划分, 可重复使用火箭的研制过程至少涉及六个相互耦合的研究方向^[15], 本文仅对各方面进行轮廓性梳理, 具体细节不做展开论述。

(1) 总体设计。可重复使用要求增加的返回推进剂、着陆机构、热防护系统以及结构加强部件均为无法入轨的“无效质量”; 更核心的影响可根据齐奥尔科夫斯基火箭公式(式1)推出。

$$\Delta v = I_{sp} g_0 \ln \frac{m_0}{m_f} \quad (1)$$

式中, Δv 为火箭获得的速度增量(理想条件下不计重力、大气阻力), m/s; m_0 为火箭初始总质量(湿质量, 含全部推进剂); m_f 为推进剂耗尽后的末质量(干质量, 箭体、有效载荷); I_{sp} 为比冲, s; g_0 为标准重力加速度, 9.80665 m/s^2 。可见任务所需推进剂质量随返场速度增量呈指数增长: 为返回预留的每一单位速度增量, 都需要以成倍放大的推进剂消耗与运力损失作为代价。因此, 在现有一次性火箭的基础上简单加装着陆腿通常无法得到合理的总体构型; 返回发射场、海上平台着陆、发射塔机械臂捕获、翼式滑翔等不同回收方案, 对应着不同的推进剂消耗、结构质量与运维成本组合, 合理方案的确定必须经过全系统的多目标权衡^[16-17]。

(2) 推进系统。一次任务中复用一级要经历起飞、返场、再入减速和着陆多次点火, 每次再启动的压力、温度和姿态条件各不相同, 着陆段还要求发动机在低推力区间稳定工作。多次启动的可靠性、深度节流带来的燃烧稳定性, 以及燃烧室、涡轮泵、密封

阀门等部件在反复热循环下的寿命一致性, 是发动机复用的三大关口^[18-22]。以我国 120 t 级液氧煤油高压补燃循环发动机为对象的系统仿真表明, 将发生器燃料路流量调节、主涡轮前燃气分流与氧化剂主路节流相结合, 具备实现 10:1 深度推力调节的潜力^[23]; 而深度节流与偏工况运行对燃烧稳定性的挑战——从非稳态燃烧过程对稳定边界的影响, 到气氧/甲烷发动机横向不稳定燃烧的“热-声-涡”耦合机理——已成为国内基础研究的重点^[24-25]。

(3) 低温推进剂管理。主发动机关机后, 箱内低温推进剂在失重和机动中晃动、破碎, 发动机再次启动前必须把液体重新沉降至出口附近并控制气枕压力——推进剂的“剩余量”与“可利用量”是两个不同的概念, 沉降设计必须考虑瞬态响应而非仅依据稳态加速度^[26]。

(4) 制导、导航与控制。返回过程连续跨越稀薄大气、高超声速、超声速和亚声速区域, 控制来源从姿控推力器逐步切换到气动舵面再到发动机推力矢量; 系统要在推进剂余量、动压、热流和落区安全的约束下, 实时求解“当前状态、可达落区、应施加控制量”三个问题, 并容忍风场、传感器和单台执行机构失效带来的不确定性^[27-29]。着陆段制导的核心是在线求解多约束下的燃料最优轨迹: 国内较早建立了火箭垂直回收着陆段的在线凸优化制导方法^[30], 将偏置比例导引与凸优化相结合可显著改善求解的收敛性与工程适用性^[31]; 嫦娥三号动力下降段则以多项式制导实现闭环速度控制, 为我国动力着陆制导积累了早期工程经验——尽管月球无大气、重力仅为地球的 1/6, 其边界条件与地球大气内的垂直回收相去甚远, 但在线轨迹重构与故障重构的工程经验仍可资借鉴^[32]。

(5) 结构与热防护。结构要同时耐受反复增压、低温收缩、再入加热和着陆冲击造成的低周疲劳, 低温绝热层与外部热防护需联合设计^[33]; 可检修、可重复使用的金属热防护系统, 被视为下一代重复使用运载器大面积防热的优选方案^[34]。箭体细长化还引入弹性模态与控制系统的耦合, 需在闭环设计中显式考虑结构柔性^[35]。

(6) 飞后检查与维护。这是把“回收完好”转化为“可审计放行依据”的环节, 也是航天飞机栽过跟头的

地方。初期运营依赖超声、射线等无损检测与发动机试车；随着飞行样本增加，飞行载荷、温度、振动数据可逐步替代部分拆解检查，其前提是传感器覆盖关键损伤模式、算法经过标定^[36-37]。随着“发动机不下箭、48 h 内再次发射”“重复使用20~50次”等前瞻性指标的提出，超声检测、图像识别、羽流光谱等原位无损检测技术成为缩短周转周期的关键支撑^[38]。维护性必须在设计阶段落实——NASA的运营成本模型把地面设施、物流、维护和流程周期统一纳入估算，提示我们单纯降低推进剂费用对总成本的影响有限，火箭设计评审必须同时审查飞行性能和地面工序^[39]。

2.3 可重复使用火箭的工程闭环要求

可重复使用火箭系统的各组成部分并非相互独立，而是构成完整的闭环链路：总体设计确定全系统质量预算，分系统试验明确各环节设计边界，飞行试验逐级拓展飞行包线范围，飞后检查与维护检测识别构件实际损伤，维修工时数据反向反馈设计迭代，复飞飞行数据进一步修正检查标准。成熟可重复使用运载系统的核心产出，不仅是火箭成功回收的工程成果，更包含稳定的工艺文件、全生命周期寿命数据库、备件保障策略与可稳定重复执行的任务节拍。可重复使用火箭技术竞争力的衡量指标，也需从“是否实现回收成功”转向同一硬件复飞次数、两次任务周转间隔、单位发射维护工时、计划外维修率与单位运力发射成本。后文在回顾中美两国可重复使用火箭工程发展路径时，将以上述指标而非单次飞行成败作为比较分析的基准。

3 美国可重复使用火箭发展历程

3.1 航天飞机项目的技术成效与经济教训

美国是全球范围内最早系统性开展运载器重复使用技术研发的国家。1972年正式立项的航天飞机项目，其核心设计目标即通过部分可重复使用构型降低单位发射成本：轨道器采用类飞机滑翔方式返回着陆，固体助推器通过降落伞减速回收，仅外贮箱为一次性使用部件。从1981年首飞成功到2011年正式退

役，五架航天飞机轨道器共计完成135次发射任务，取得了空间站建造、哈勃空间望远镜部署与在轨维修等具有里程碑意义的工程成果。

但航天飞机在经济上是失败的。项目早期预估单次飞行成本仅约930万USD（按2011年美元折算约5400万USD）^[40]；而按全寿命周期推算，实际单次飞行成本高达约14.5亿USD（2010—2011年不变美元）——航天飞机计划30年间共投入约10960亿USD、执行135次任务，摊算即达这一量级^[41]。两组数字均已折算至同一年份的不变美元，因而具备可比性：实际超出早期预估近27倍。造成该结果的根本原因在于，航天飞机为兼顾载人、载货与多类军用任务需求，整体构型设计异常复杂，每次返回后需开展数月周期的全面翻修作业，并投入大量专业人工开展检查工作，隔热瓦、主发动机等核心关键部件几乎在每次飞行后都必须拆解检修。其仅在技术层面实现了“重复飞行”，并未达成经济层面的“高效复用”目标。德国航空航天中心（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR）关于可重复使用运载器成本估算的研究也指出，低翻修负担和短周转时间是复用系统形成成本优势的前提，而这恰恰是航天飞机未能跨越的门槛^[42]。航天飞机工程留下的经验教训，为后续所有可重复使用运载方案确立了核心判别准则：回收仅为工程实现的起点，检查维护负担与周转效率才是决定复用方案经济性的核心要素。

3.2 NASA 航天采购机制的转型实践

航天飞机退役前后，美国国家航天体系进行了一次深刻的机制调整。2006年启动的商业轨道运输服务（commercial orbital transportation services, COTS）项目放弃了传统的“成本加成”合同，转而采用预先议定技术里程碑、按客观成功判据付款、企业同时投入自有资本的模式。以SpaceX为例，其初始协议包含22个技术里程碑、NASA承诺金额最高2.78亿USD，后增至3.96亿USD^[43]。这种机制把公共资金与阶段成果直接挂钩，把技术路线选择权和成本控制权交给了企业，NASA则退居需求方、评审方和采购方的角色。正是在这一轮机制转换中，轨道科学公司、SpaceX等一批商业公司登上历史舞台；创立时

间更早的蓝色起源（2000年创立，早于SpaceX的2002年）亦于后续阶段加入市场竞争。可见企业成立的先后与其被纳入公共采购体系的时点并非一回事，真正起作用的是机制窗口是否打开，而非企业资历的深浅。

概而言之，美国可重复使用火箭领域的突破，本质上首先是制度机制层面的突破：并非由NASA自主研制出可重复使用火箭，而是NASA构建了允许民营经济主体参与可重复使用火箭研制的制度环境。这一机制转型可置于“国家创新体系（national innovation system）”的分析框架下展开解读——公共采购、需求侧政策与风险共担，是塑造民营企业技术创新路线的核心制度安排^[44-46]；正是这种将公共资金配置与阶段研发成果直接挂钩、将技术路线选择权交由企业自主掌握的制度设计，使得SpaceX能够在NASA的订单与标准框架下完成技术的快速迭代。

3.3 SpaceX 可重复使用火箭工程实践

SpaceX的成功既非单点技术发明层面的突破，也非“成熟技术的简单重组”，本质上属于工程范式层面的创新。从工程原创性维度考察，该企业是在既有成熟技术的基础上，完成了一系列关键技术的自主突破：通过栅格舵实现返回段气动控制，依托着陆腿缓冲落区冲击，借助发动机深度节流与多次启动匹配着陆推力区间，采用低成本不锈钢箭体承载热载荷与结构载荷，并将着陆机构从箭体转移至地面抱臂塔，以此降低箭体携带的无效质量^[47]。这一“刚体箭体+液体发动机”的技术路线看似质朴，却实现了有效的成本控制——它并非对既有方案的简单拼接，而是针对回收全流程的工程再创新。

需要指出的是，在SpaceX开展相关研发之前，全球范围内已有机构启动可重复使用火箭的相关探索，且该技术领域并非源自美国传统航天体系。由波音与洛克希德·马丁两大航天巨头联合组建的联合发射联盟（United Launch Alliance, ULA），尽管拥有最为充裕的技术储备与资金支持，却始终止步于一次性运载火箭路线；NASA在航天飞机项目之后，同样未能研制出具备经济可行性的可重复使用运载器。最终实现可重复使用火箭工程化突破的，是2002年方

才成立的民营航天企业SpaceX，且该成果的取得历经了长期艰苦的技术探索：创业初期，猎鹰一号火箭连续三次发射失败，公司一度濒临破产；从低空悬停试验到海上着陆回收，研发团队历经七年持续试验、屡败屡战，直至2015年12月才最终完成首次一子级陆上回收。由此可见，该领域发展的决定因素并非资源储备规模，而在于创新机制是否允许快速试错、研发成本是否形成刚性约束，以及市场需求是否真实存在。

更重要的是迭代方式。SpaceX按构型建立基线、容忍试飞失败、以高频次飞行试验快速积累数据，这与传统航天“一次成功”的归零文化形成鲜明对照：截至2026年8月25日，猎鹰九号当年已完成100次发射，SpaceX全舰队累计轨道发射近700次，累计完成一子级回收650余次，任务成功率超过99%；全舰队已有6枚一子级的飞行次数达到30次以上。2025年165次发射中约3/4服务于星链组网，内部载荷为复用资产提供了稳定任务量。与此同时，SpaceX把星链卫星的制造、发射和网络运营置于同一体系，垂直整合的需求供给共同构成了其模式的完整图景。

3.4 美国及其他国家可复用火箭多元探索

美国其他商业公司的复用程度深浅不一。此处所谓“复用深度”，指同一件硬件在其寿命周期内可重复使用的次数与范围：只回收复用一子级者最浅，一二级全部回收者居中，整箭完全复用者最深。蓝色起源（Blue Origin）的亚轨道飞行器“新谢泼德号”（New Shepard）2015年即完成助推器垂直着陆、次年实现同一助推器复飞，其轨道级火箭“新格伦号”（New Glenn）亦已在轨道任务中完成一子级海上着陆^[48]；“火箭实验室”（Rocket Lab）的“中子号”（Neutron）、“斯托克航天”（Stoke Space）的“诺瓦号”（Nova）与“相对论空间”（Relativity Space）的“人族R号”（Terran R）三型在研可复用运载火箭，则分别在海上平台回收与全箭复用等方向上探索差异化方案。欧洲的“忒弥斯”（Themis）验证机以演示低成本可复用一级所需的关键技术为目标，配套研制的“普罗米修斯”（Prometheus）液氧甲烷发动机突

出深度推力调节与多次使用能力; 欧日合作的“卡利斯托”(CALLISTO)项目把制导控制、推进剂管理和发动机维护列为关键技术, 发展出用于再入气动制导的鲁棒控制方法, 以小型验证机打通从起飞、着陆到再次发射的全流程^[49-50]; 印度空间研究组织(ISRO)的“普什帕克”(Pushpak)有翼返回器完成一系列自主着陆试验, 走升力式横向机动的另一条路线。当前可重复使用火箭技术已呈现全球扩散的发展态势, 但从飞行试验频次与构型迭代速度维度来看, 全球其他国家的研发进展与美国头部航天项目相比仍存在数量级差距。

4 中国可重复使用火箭发展历程

4.1 国家队技术积累与体制现实问题

20世纪80年代末启动的国家“863”计划已将“大型运载火箭及天地往返运输系统”确立为重点研究方向, 20世纪90年代我国依次开展可重复使用运载器的方案论证与关键技术预研工作, 最终形成了从部分重复使用到完全重复使用、从火箭动力到组合动力、从两级入轨到单级入轨的清晰战略发展思路^[51-52]。上述梳理表明, “重复使用运载器”并非国内在外部技术示范引导下才确立的研究方向, 而是国内航天学界长期持续关注的核心研究命题。以张贵田院士为代表的科研团队早在二十余年前即已突破高压补燃液氧煤油发动机技术, 该技术随后在长征五号、六号、七号、八号等型号上实现了成熟应用^[53]; 仅从液体动力技术维度来看, 我国很早就具备支撑可重复使用火箭发展的技术基础。由中国运载火箭技术研究院(一院)抓总研制的长征八号运载火箭在首飞任务中即完成了补燃循环液氧煤油发动机推力调节能力的验证, 并按照集束式回收方案推进垂直返回关键技术攻关^[54]; 针对重复使用航天运载器的推力调节、多次起动、着陆制导与控制、着陆缓冲机构等关键技术方向, 国内已形成系统化的攻关布局^[55]。依托长征系列运载火箭完成的栅格舵落区控制飞行验证, 国内学界与工程界已在栅格舵选型设计与工艺、宽速域气动优化以及子级垂直回收布局的气动特性等方向积

累了成体系的研究成果^[56-59]。

但既有成熟技术并未自然演化形成可重复使用商业火箭, 其根源并不在于技术层面, 而在于经济体制维度: 在“举国体制”的国家任务模式下, 航天型号研制以任务成功为最高目标, 成本并未纳入核心约束范围。从后发国家技术追赶的视角来看, 我国拥有成熟的液体动力技术基础却长期未推动其商业化应用, 正是“后发优势”与“后发劣势”并存的典型体现——我国既具备可借鉴的成熟技术轨道^[60], 同时也面临技术能力向产业能力转化的制度鸿沟^[61]。路风^[62]在关于自主创新路径的研究中指出, 真正的技术能力仅能通过自主开发实践生成; 若技术积累仅局限于体制内部, 则需依托新机制方可完成向商业竞争力的转化。

4.2 商业航天政策演进与地方产业布局

尽管外部产业刺激最早起源于美国, 但中国商业航天领域的政策准入放开时间早于猎鹰九号的首次成功回收。2014年11月, 国务院印发《关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见》(国发〔2014〕60号), 明确提出鼓励民间资本参与国家民用空间基础设施建设^[63]; 该时间节点较2015年12月猎鹰九号完成首次一级陆上回收提前约一年, 即政策放开构成了我国可重复使用火箭商业化发展的制度前提, 而外部技术示范进一步验证了可重复使用技术路线的现实可行性, 二者为先后叠加的关系。2015年10月, 《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)》正式发布, 进一步明确鼓励社会资本进入相关领域^[64], 该年份也被学界界定为“中国商业航天元年”; 2019年, 《关于促进商业运载火箭规范有序发展的通知》进一步明确了商业运载火箭的市场地位^[65-66]; 2024年, “商业航天”首次被纳入《政府工作报告》^[7]; 2025年11月, 《国家航天局推进商业航天高质量发展安全发展行动计划(2025—2027年)》发布^[67], 提出开放竞争性国家科研项目、推动民用与商用航天标准体系融合。梳理十余年政策演进历程可见, 国家层面政策导向逐步从“允许进入”转向“鼓励发展”, 最终迈向“规范提质”。

中央政策定调后, 各地迅速开展响应布局。上海

围绕“千帆星座”集聚卫星制造与运营企业；海南建成我国首个商业航天发射场，为高频次发射提供公共基础设施支撑；北京、雄安、成都等地也相继完成相关产业布局。在火箭制造领域，两座中小城市的发展路径颇具代表性：无锡梁溪依托东方空间等“链主”企业布局可重复使用火箭及配套产业，配套总规模超600亿RMB的基金群；安徽蚌埠则依托老工业基地的制造底蕴切入火箭发动机等核心环节，配套规模约95亿RMB的产业基金，连续举办商业航天产业发展大会，集聚产业链上、下游企业。地方政府以产业园区、专项基金、发射订单和服务专班承接中央政策落地，将市场机制引入航天产业的空间布局——企业的选址、扩产与供应链组织，越来越多地遵循产业逻辑

而非行政规划逻辑。上述十余年间的关键发展节点，可参见表2^[7,63-65]。

这一过程体现了新型举国体制下“有效市场”与“有为政府”的协同：中央通过国家文件放开市场准入，地方以产业园区、产业基金、项目订单承接产业布局，企业在产学研互动中实现技术外溢与能力积累^[68-71]。

4.3 民营火箭企业的发展与市场筛选

我国商业航天政策放开后，翎客航天、零壹空间、蓝箭航天、星际荣耀等一批民营运载火箭企业于2015年前后相继成立^[72]。发展初期，多数企业选择以小型固体火箭作为技术切入方向，该方案具有结构

表 2 中国商业航天发展大事记（2014—2026）
Table 2 Milestones of China's commercial spaceflight (2014—2026)

时间	标志性事件	意义
2014 年 11 月	国务院发布《关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见》（国发〔2014〕60 号），鼓励民间资本参与航天	政策破冰
2015 年	《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015—2025 年）》发布；民营火箭公司密集成立；“中国商业航天元年”；外部标猎鹰九号完成首次一级陆上回收 ^①	标杆确立
2018 年	零壹空间、星际荣耀完成亚轨道飞行；朱雀一号执行首次民营轨道级发射	民营火箭发射元年
2019 年	双曲线一号首次实现民营火箭入轨；《关于促进商业运载火箭规范有序发展的通知》印发	民营入轨突破；规则确立
2020 年	谷神星一号首飞；卫星互联网纳入“新基建”	商业发射连续化起步
2022 年	力箭一号首飞；朱雀二号完成首次飞行	大运力固体与液氧甲烷双线推进
2023 年	朱雀二号遥二实现全球首枚入轨的液氧甲烷火箭发射任务；天龙二号完成首飞即入轨；当年国内商业航天领域融资活动约 170 起，融资总规模超 185 亿 RMB	液体路线打通；资本加码
2024 年	“商业航天”被写入《政府工作报告》；海南商业航天发射场正式投运；全年完成商业发射 43 次，占全年发射总量的 63.2%	升级为国家重点培育的新增长引擎；基础设施落地
2025 年	朱雀三号遥一（12 月 3 日）、长征十二号甲遥一（12 月 23 日）先后完成二子级入轨任务，一子级回收任务均未取得成功；国家航天局印发商业航天领域高质量发展行动计划	进入入轨级回收验证阶段
2026 年	2 月 11 日，长征十号系列运载火箭完成可重复使用技术低空演示验证与一子级海上溅落回收任务。7 月 10 日，长征十号乙运载火箭完成全球首次运载火箭一子级海上网系回收试验。8 月 19 日 7 时 35 分，蓝箭航天朱雀三号遥二运载火箭在东风商业航天创新试验区发射升空；起飞约 137 秒后，二子级将鸿擎科技自主研制的鸿鹊 03 星准确送入预定轨道；7 时 41 分许，火箭一子级按预定程序成功完成软着陆，着陆场坪位于甘肃省民勤县	海上回收与陆地垂直回收两条技术路径相继打通；8 月 19 日完成我国首次运载火箭一子级陆地垂直着陆回收试验，我国可重复使用运载火箭技术正式迈入复飞验证阶段

①2015 年 12 月，SpaceX 猎鹰九号运载火箭完成首次一子级陆上回收任务，为全球可重复使用运载火箭技术确立了现实化发展标杆；该事件发生于我国商业航天政策放开（2014 年 11 月国发 60 号文）后约 1 年，仅作为后续发展的外部参照，并非我国放开商业航天政策的动因。注：政策文件综合自《关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见》（国发〔2014〕60 号）^[63]、国家发展改革委等《国家民用空间基础设施中长期发展规划（2015—2025 年）》^[64]、《关于促进商业运载火箭规范有序发展的通知》（2019）^[65]、《政府工作报告》（2024）^[7]与国家航天局《推进商业航天高质量发展行动计划（2025—2027 年）》；民营公司里程碑以官方宣布及权威媒体核实为准。

简单、研发周期短、资金门槛相对较低的特点。2018年成为中国民营火箭发射元年：零壹空间OS-X、星际荣耀双曲线一号S先后完成亚轨道飞行试验；同年10月，蓝箭航天朱雀一号成为中国首枚进入国家发射场执行轨道发射任务的民营火箭。2019年7月，星际荣耀双曲线一号遥一成功将有效载荷送入预定轨道，实现中国民营火箭轨道级发射零的突破^[73]。

固体火箭仅能实现民营火箭从无到有的技术突破，无法满足发射成本控制的需求。针对大规模低轨星座的组网建设需求^[74]，具备更大运载能力、更低单位发射成本且可支持重复使用的液体火箭成为行业发展的必然方向，国内民营火箭企业的技术路线随之出现分化：星河动力以谷神星一号固体火箭率先形成连续商业发射能力，同步开展液体火箭型号研制；蓝箭航天将液氧甲烷动力火箭作为主攻方向，于2023年7月完成朱雀二号遥二全球首次液氧甲烷火箭入轨发射；天兵科技天龙二号于2023年4月实现首飞即入轨，成为二十余年来全球首型首飞即成功入轨的民营液体火箭；中科宇航以力箭一号固体火箭作为技术切入点，于2022年7月完成首飞，2023年6月以“一箭26星”刷新国内一箭多星发射纪录，随后将研发方向转向力箭二号液体火箭^[75-76]。与此同时，市场筛选机制逐步启动：不同企业在融资规模、技术积累与供应链组织能力层面的差距逐渐拉开，一批早期创业公司因竞争力不足退出市场——行业内的优胜劣汰，是市场竞争机制发挥作用的正常表现。

纵观上述民营企业，其发展路径与生存逻辑已逐步清晰：蓝箭航天自主研发天鹊系列液氧甲烷发动机，为朱雀系列火箭提供配套，朱雀三号不锈钢可重复使用箭体火箭已率先进入入轨飞行与回收验证阶段；星际荣耀以双曲线一号火箭率先完成中国民营火箭轨道级发射，随后转向研发双曲线三号液氧甲烷可重复使用火箭，遵循先实现轨道发射、再突破重复使用技术的发展节奏；中科宇航依托力箭一号火箭的批量化发射维持现金流，同时通过布局力箭二号液体火箭与可重复使用技术谋求产业升级^[77-78]。

除运载火箭总体研制企业外，以九州云箭为代表的民营航天发动机企业选择不涉足整箭研制，专注于液氧甲烷动力系统研发，目前已为多家火箭总体单位

提供产品配套——第三方动力供应商能够实现生存并逐步扩大产能，表明我国民营商业航天产业链分工正持续细化，行业发展已从零散企业集聚阶段迈入成熟产业培育阶段。

4.4 金融资本对火箭研制的支撑作用

商业航天发展的第三类核心驱动力来源于金融资本支持。运载火箭研制属于典型的重资产、长周期、高风险行业，民营火箭企业从成立到首次完成轨道级发射，通常需要数十亿RMB资金投入，研发周期长达5~8年，且该阶段几乎无经营性收入。在传统的国家任务主导体制下，相关研发投入由财政资金承担；而在市场机制主导的发展模式下，需要有资本愿意为技术与市场的不确定性承担风险，这正是金融资本在商业航天产业发展中承担的核心功能。当资本识别到发射成本下降将开辟全新的产业增长空间后，风险投资与私募股权资金便大规模涌入，推动我国商业航天年度融资规模持续创出新高^[79]。与此同时，资本市场的制度通道也逐步开放：2025年12月26日，上海证券交易所发布商业火箭企业适用科创板第五套上市标准的专项指引；五日后，即2025年12月31日，蓝箭航天科创板首次公开发行股票（IPO）申请获得受理；2026年3月，中科宇航的上市申请也获得受理。

我国商业航天资本结构的特色体现为，在市场化风险投资（VC）、私募股权（PE）之外，还存在规模体量庞大的政府引导基金与地方产业基金：如4.2节所述，仅无锡、蚌埠两地投向空天领域与商业航天产业的基金规模即分别达到600亿RMB与95亿RMB量级。地方政府通过“基金+园区+订单”的组合模式深度介入产业发展，实际承担了“耐心资本”与“风险共担者”的双重职能，这一特征在以私人资本为主导的美国商业航天发展模式并不存在。资本的介入重构了商业航天行业的研发模式，民营企业得以依托持续融资支撑长周期、高风险的发动机研制与飞行试验，无须等待国家任务立项即可推进相关研发工作。

置于更宏观的产业背景下考察，商业航天领域的融资热潮是中国资本结构转型的典型缩影：我国股权投资的核心配置方向正逐步从房地产、互联网与传统消费领

域转向硬科技领域,“投早、投小、投硬科技”已从发展理念转变为实际资本投向。需要指出的是,资本驱动发展模式的另一面是估值压力与同质化竞争问题,当前多数民营商业航天企业尚未形成稳定利润闭环,其商业模式仍高度依赖星座组网订单的落地进度;未来行业能否实现从“融资驱动”向“收入驱动”的发展转型,将决定本轮资本热潮的最终发展质量。

4.5 军民融合模式下的回收技术验证

相较于美国“NASA单一国家队牵头、民营企业协同参与”的产业格局,中国已形成国家队与民营企业职能分工明确、协同推进的商业航天军民融合格局,这一格局正是新型举国体制推动军民科技协同创新的典型体现^[80]。近两年来,该发展格局在可重复使用运载火箭的系统级验证领域已密集产出阶段性成果。

2025年12月,民营企业蓝箭航天研制的朱雀三号遥一运载火箭成功完成入轨,但一子级在返回段距地面约3.3 km处执行着陆点火后发生异常燃烧,未能完成软着陆任务;同月23日,由航天科技集团八院抓总研制的长征十二号甲遥一运载火箭发射,其二子级顺利进入预定轨道,一子级回收任务同样未获成功,本次任务整体取得基本成功。上述两次任务均获取了真实飞行环境下回收段的实测数据,同时证明入轨成功与回收成功属于两类耦合关联但判据相互独立的任务目标。2026年2月11日,由航天科技集团一院抓总研制的长征十号系列运载火箭系统低空演示验证飞行试验取得成功,一子级箭体按照预定程序在预定海域完成海上溅落回收。

核心技术突破发生于2026年夏季。7月10日,由中国运载火箭技术研究院抓总研制的长征十号乙运载火箭于海南商业航天发射场完成发射,顺利将有效载荷送入预定轨道;火箭一子级完成垂直返回流程,由海上回收平台“领航者”号通过“井”字形高强度缓冲拦阻网系配合箭上挂索机构完成箭体捕获,实现我国首次运载火箭一子级可控回收,同时也是全球首次采用网系方案完成运载火箭回收任务。该箭体全长约63 m、直径5 m,重复使用状态下近地轨道运载能力约16 t,本次任务成功验证了发动机多次启动与高空点火、隔板贮箱推进剂管理、高精度导航控制、海

上平台网系捕获等一系列关键技术。在此次任务完成一个多月后的8月19日7时35分,蓝箭航天研制的朱雀三号遥二运载火箭于东风商业航天创新试验区发射升空;7时41分许,火箭一子级按照预定程序在甘肃省民勤县着陆场坪完成软着陆;起飞约137 s后,二子级将鸿擎科技自主研制的鸿鹄03星准确送入预定轨道。本次任务是我国首次实现火箭一子级陆地垂直着陆回收,同时也是我国民营运载火箭首次完成成功回收,系统验证了“液氧甲烷推进剂+不锈钢箭体结构+着陆腿垂直回收”技术路线的工程可行性。与朱雀三号遥一任务相比,遥二任务的核心意义在于同时满足了“入轨成功”与“回收成功”两项独立判据——此前朱雀三号遥一与长征十二号甲遥一任务均仅实现入轨成功,未完成回收目标,遥二任务首次实现两项任务目标同时达成,证明返回段任务失利不属于原理性层面的障碍,本质为工程可靠性问题。

以第2节提出的五层技术标尺衡量,我国当前已在第二层“完整回收”层面打通了海上回收与陆地回收两条技术路径,当前正逐步向第三层“状态判定与有限整修”和第四层“同一硬件复飞”推进——长征十号乙研制团队已明确提出,计划于2026年底前完成该枚一子级的复用飞行试验。我国据此已形成液氧煤油路线与液氧甲烷路线并行、陆地着陆回收与海上回收并行、国家队主体与商业航天企业主体并行的多元化技术发展格局。

5 中美可重复使用火箭发展路径对比

5.1 中美发展路径总体特征对比

美国的发展经验可概括为“机制先行”:NASA率先完成了从直接主导航天项目向采购商业航天服务的制度转型,构建出适配里程碑采购、固定价格合同且需求侧开放的市场环境;商业资本在此环境中,将已成熟的液体火箭技术重新整合为低成本产品,并依托星链这类内部需求完成了商业闭环。中国的发展经验则可概括为“积累先行”:液体发动机等核心技术早已在国家队体系内发展成熟,但早期缺乏推动其商业化应用的体制通道;随着外部成功路径的示范效应

显现, 叠加国内早已启动的政策放开, 民营企业和金融资本陆续涌入, 技术积累借助人才流动与军民融合逐步外溢至商业体系, 最终以国家队与民企并行的模式完成了系统级验证。两条路径起点不同、主体不同、节奏不同, 却最终指向同一发展方向——液体可复用火箭 (两国代表型号对比见表 3)。

中美二者之间的差异同样清晰, 可以从五个维度展开对称审视。其一, 需求侧成熟度: 美国可复用火箭有星链这一内部巨型订单托底, 可复用资产的利用率得到充分保障; 中国的低轨星座组网刚刚起步, 多数商业火箭企业仍依赖外部订单和一级市场融资, 完整利润闭环尚未形成。其二, 迭代机制: SpaceX 依托高频次飞行试验包容试验失败、实现技术快速迭代; 中国总体上仍延续稳妥归零的型号研发文化, 飞行样本积累速度相对较慢。其三, 发展阶段位置: 猎鹰九号已进入舰队化运营阶段; 中国刚跨过一级可控回收的技术门槛, 正处于由回收验证向复飞验证过渡的关键节点。其四, 产业组织方式: 中国已形成地方政府依托产业园区、产业基金和政策服务吸引布局商业航天企业的区域竞争格局, 政府引导基金成为行业资本供给的重要组成部分; 美国则以私人风险资本为主要供给来源, 产业布局自发聚集于工程配套与发射资源富集区域。其五, 军民关系: 中国形成了国家队与民企并行发展的军民融合格局, 商业航天与国家安全目标的交织程度更深; 美国则以商业公司为发展主体, 国家层面主要通过采购需求对行业发展进行间接介入。

5.2 垂直着陆与网系捕获两类火箭回收技术方案对比

两条路径在回收方案上的不同选择, 为开展比较提供了具体技术切入点——针对各类运载器回收技术路线的系统分类与权衡, 已有专门综述可供参考^[81]。相关权衡主要集中在推进剂预留、结构死重与回收平台配套三个环节。就推进剂预留而言, 采用动力垂直着陆方案的一子级在返场前需要依次完成返场机动、再入减速与着陆燃烧, 每个阶段都需要预留推进剂, 且预留量与上升段运力相互耦合。针对返回发射场与沿弹道方向海上回收两种方式的弹道分析和反推动力研究均

表明, 返回发射场需要额外的返场速度增量, 运力损失明显高于海上回收, 猎鹰九号因此对高能任务一律采用海上回收方案^[82-84]。

就结构死重而言, 着陆腿连同其展开锁定与缓冲机构是随箭的无效质量, 设计上须在支撑稳定性与轻量化之间反复权衡^[85-86]; 网系捕获的思路则是把末端缓冲与支撑功能从箭上转移到回收设施——一级受控返回后在海上回收平台上方由网系装置接住并缓冲, 可以省去或大幅简化箭上着陆机构, 也放宽了对末端着陆速度与落点姿态的苛刻要求。长征十号乙的首次成功回收, 正是这一方案思路的工程落地; 它与星舰把着陆机构从箭上转移到地面抱臂塔的演进方向异曲同工——都试图让不能入轨做功的质量离箭而去。

回收平台配套环节的差异, 体现了两条路径各自面临的现实约束。猎鹰九号采用的海上无人驳船依靠动力定位维持位姿, 甲板面积有限, 对着陆精度要求较高, 但回收判据清晰明确, 数千次回收复飞已充分验证了其工程闭环的可靠性; 网系捕获平台则需要更大的捕获面积与缓冲系统, 还需要应对平台随海况运动、捕获窗口预测、回港转运与海洋环境防腐等新问题, 系统复杂度从火箭本身转移到了海上基础设施, 这与空中捕获方案 (伞降减速后由载机在空中捕获、拖曳返场) 同属“以地面设施换箭上代价”的技术思路^[87]。结合中国内陆落区的约束条件与海南发射场的海岸区位来看, 网系捕获具备现实合理性; 但两种方案的优劣, 最终仍要由复飞次数、周转周期与单位运力成本这些运营数据来判定。

5.3 中美产业能力的差距与发展潜力

将比较进一步聚焦到产业能力层面, 可以发现差距与潜力二者并存, 同样值得我们正视。在设计研发层面, 中国在液氧煤油、液氧甲烷发动机以及返回制导控制领域已不存在原理性代差, 长征十号乙与朱雀三号的回收试验充分验证了我国的系统整合能力; 在加工制造层面, 中国拥有完备的电子、材料与装备制造体系, 这是天然的发展优势; 但可复用构件的疲劳寿命数据库、发动机的批量低成本制造能力, 以及面向复用需求的材料工艺——如不锈钢薄壁贮箱焊接、防热结构规模化生产——仍需要通过大量飞行试验样

表3 中美代表性可重复使用火箭型号对比（截至2026年8月）
Table 3 Representative reusable rockets of China and the United States (as of Aug. 2026)

型号	国家/研制方	推进剂	回收方式	最新进展
猎鹰九号	美国/SpaceX	液氧煤油	着陆腿，陆上或海上平台	舰队化运营；一子级按40次飞行完成鉴定定型，2025年执行的165次发射任务中，157次任务采用了飞行复用后的助推器
星舰	美国/SpaceX	液氧甲烷	发射塔机械臂捕获（助推器）、海面溅落（上级）	综合飞行试验已进行至第十三次（2026年7月）；上级尚未实现回收
新格伦	美国/蓝色起源	液氧甲烷	海上平台垂直着陆	2025年11月首次完成一子级海上回收；2026年4月完成首次一子级复用
朱雀三号	中国/蓝箭航天	液氧甲烷	着陆腿，陆上回收场坪	2025年12月入轨；2026年8月完成我国首次一子级陆地支腿回收
长征十二号甲	中国/航天科技集团八院	液氧甲烷	一子级陆地垂直回收（试验）	2025年12月二子级入轨，一子级回收未成功
长征十号乙	中国/航天科技集团一院	一级液氧煤油、二级液氧甲烷	海上网系捕获	2026年7月完成我国首次一子级可控回收，亦为全球首次运载火箭网系回收

注：统计的型号进展信息综合自各研制单位官方发布内容，涵盖中国航天科技集团、蓝箭航天、SpaceX、蓝色起源，以及国家航天局公开信息；信息取舍规则为以官方公布的入轨与回收结果为准，试验性构型以公开披露的最新状态为准；相关数据统计截至2026年8月。

本积累与产线磨合持续完善。在产业链供应链层面，SpaceX 依托美国成熟的航空制造配套体系，通过垂直整合压缩了外购环节占比，而中国民营火箭的供应链尚处于国家队配套体系与市场化配套体系之间的过渡阶段，在成本控制与响应速度上仍有优化空间。这些短板大多不属于核心原理层面的问题，而是工程积累与规模经济层面的问题，恰恰是可以时间逐步解决，也值得借鉴美国经验加快突破的领域。

6 结论与展望

近十年商业航天兴起，得益于以火箭可重复使用为核心的系统性成本下降，发射成本由此成为影响产业格局的关键变量。本文以成本为主线，将可重复使用火箭作为以降本为总目标的系统工程，比较中美工程路径，发现两国技术路线方向一致，差异在将技术积累转化为产业能力的机制与节奏不同，具体而言：

（1）降本本是系统涌现的结果，回收成功不等于降本成立。返回推进剂预留、着陆机构死重、热防护与结构冗余均需从运力扣除，回收后检查、翻修与周转决定代价能否被足够飞行次数摊薄；航天飞机运营史表明技术重复飞行与经济高效复用间存在实质鸿沟。竞争力基准应是同一硬件复飞次数、任务周转间隔与

单位运力成本，而非回收动作本身。

（2）美国路径机制先行、企业整合。NASA 从“办航天”转向“买服务”，以里程碑付款、固定价格合同与需求侧开放重构激励，使技术路线与成本控制权落到企业；SpaceX 据此完成栅格舵、着陆腿、发动机深度节流与多次启动、不锈钢箭体及地面抱臂塔捕获等整合，并以星链组网需求为复用资产托底，使降本、复用与需求形成闭环。

（3）中国路径积累先行、转化有赖制度通道。我国自“863”计划起即在液体动力、返回制导控制与着陆机构方向布局成体系攻关，研发层面无原理性代差；但积累长限于国家任务体系，成本未纳核心约束。2014 年以来市场准入放开、民企成长、地方以产业园区与产业基金承接、金融资本介入，构成技术外溢与转化通道，印证技术能力须自主生成、产业化还需市场提供需求、资本与试错空间。

（4）两类回收方案是同一系统逻辑在不同约束下的展开。垂直着陆与海上网系捕获差异集中于推进剂预留、结构死重与回收平台配套，同属以地面设施换取箭上代价；优劣无先验答案，终须由复飞次数、周转周期与单位运力成本判定。

就发展前景而言，美国一侧猎鹰九号已舰队化运营，星舰推复用至“全箭复用、不锈钢箭体、地面捕

获”,需求由星链与国家安全发射托底;瓶颈正由需求转向基础设施与监管——联邦靶场道路、港口与安保承压,发射许可与频谱协调或成比技术更紧的约束^[88]。中国一侧将沿着“从部分到完全重复使用、从两级到单级入轨”推进^[89];2026年长征十号乙与朱雀三号遥二分别打通上网系捕获与陆地垂直着陆两条路径。跨越难点不在返回,而在寿命数据库、备件保障、原位无损检测与标准规范,即整修体系能否

落地;政策侧竞争性项目开放与民商标准融合、资本侧长期资金供给,是体系建成关键。

对于火箭复用降本技术的后续研究可在两个方向上继续推进:一是随着复飞数据积累,将比较由路径层面推进至绩效层面,对复飞次数、周转周期与单位运力全成本作可核算横向对照;二是两类方案长期运营的维护负担与平台成本差异尚缺公开数据,待实证补充。

参考文献

- [1] 李超,贾海鹏,聂学峰,等. 2025年中国商业航天发展回顾与展望[J]. 中国航天, 2026(1): 52-58.
Li C, Jia H P, Nie X F, et al. Review and prospect of China's commercial aerospace development in 2025[J]. Aerospace China, 2026(1): 52-58.
- [2] Jones H W. The recent large reduction in space launch cost[C]//48th International Conference on Environmental Systems: ICES-2018-81. Albuquerque, NM: ICES, 2018: 1-10.
- [3] SpaceX. Form S-1 registration statement[R/OL]. Washington, D.C.: U.S. Securities and Exchange Commission, 2026. (2026-05-20)[2026-09-06]. <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1181412/000162828026036936/spaceexplorationtechnologi.htm>.
- [4] Pielke Jr R, Byerly R. Shuttle programme lifetime cost[J]. Nature, 2011, 472: 38.
- [5] Abels J. Private infrastructure in geopolitical conflicts: The case of Starlink and the war in Ukraine[J]. European Journal of International Relations, 2024, 30(4): 842-866.
- [6] 王太军,唐麟基,周超. "星链"在俄乌军事冲突中的应用探研[J]. 通信技术, 2022, 55(8): 1006-1013.
Wang T J, Tang S Q, Zhou C. Research on starlink applications in Russia-Ukraine military conflict[J]. Communications Technology, 2022, 55(8): 1006-1013.
- [7] 国务院. 政府工作报告: 2024年3月5日在第十四届全国人民代表大会第二次会议上[R]. 2024.
State Council. Report on the work of the government: Delivered at the second session of the 14th National People's Congress on March 5, 2024[R]. 2024.
- [8] 穆桐,王显煜,李静玲,等. 手机直连卫星技术发展展望[J]. 空间电子技术, 2025, 22(S1): 163-170.
Mu T, Wang X Y, Li J L, et al. Development and future prospects of direct-to-satellite technology for smartphones[J]. Space Electronic Technology, 2025, 22(S1): 163-170.
- [9] 包为民. 可重复使用运载火箭技术发展综述[J]. 航空学报, 2023, 44(23): 1-26.
Bao W M. A review of reusable launch vehicle technology development[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(23): 1-26.
- [10] Goddard R H. A Method of Reaching Extreme Altitudes[M]. Washington, D.C.: Smithsonian Institution, 1919.
- [11] 王竞研. 罗伯特·戈达德: 从非主流到主流的火箭先驱[J]. 自然辩证法通讯, 2023, 45(12): 114-126.
Wang J Y. From non-mainstream to mainstream rocket pioneers: Robert Goddard[J]. Journal of Dialectics of Nature, 2023, 45(12): 114-126.
- [12] 谭永华. 大推力液氧甲烷火箭发动机技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(11): 1-13, I0002.
Tan Y H. Research progress in high thrust liquid oxygen methane rocket engine technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(11): 1-13, I0002.
- [13] 陈建华,曹晨,杨永强,等. "长征五号"火箭液氧煤油发动机总体技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(4): 354-361.
Chen J H, Cao C, Yang Y Q, et al. General technical review of Long March 5 liquid oxygen kerosene engine[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(4): 354-361.
- [14] 郑大勇. 重复使用液氧甲烷发动机研制进展及关键科学与技术问题[J]. 宇航总体技术, 2026, 10(3): 75-86.
Zheng D Y. Development progress and key scientific and technological issues of reusable liquid oxygen/methane rocket engines[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2026, 10(3): 75-86.

- [15] Zhong Y, Liu D H, Wang C. Research progress of key technologies for typical reusable launcher vehicles[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 449(1): 012008.
- [16] Dietlein I, Bussler L, Stappert S, et al. Overview of system study on recovery methods for reusable first stages of future European launchers[J]. CEAS Space Journal, 2025, 17(1): 71-88.
- [17] 李杨, 刘昶, 王吉飞, 等. 垂直起降运载火箭总体方案研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(S1): 1-6.
Li Y, Liu C, Wang J F, et al. General design study of vertical takeoff and landing launch vehicle[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S1): 1-6.
- [18] 李斌, 张小平, 高玉闪. 我国可重复使用液体火箭发动机发展的思考[J]. 火箭推进, 2017, 43(1): 1-7.
Li B, Zhang X P, Gao Y S. Consideration on development of reusable liquid rocket engine in China[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(1): 1-7.
- [19] 李斌, 李程, 高玉闪, 等. 重复使用运载火箭液体动力技术发展[J]. 火箭推进, 2024, 50(1): 1-11, I0002.
Li B, Li C, Gao Y S, et al. Development of liquid propulsion technology for reusable launch vehicle[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(1): 1-11, I0002.
- [20] 金平, 吕俊杰, 戚亚群, 等. 可重复使用液体火箭发动机寿命问题探讨[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(4): 51-59.
Jin P, Lyu J J, Qi Y Q, et al. Discussion on the life of reusable liquid rocket engine[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(4): 51-59.
- [21] 尕永婧, 李文钊, 宋乾强, 等. 重复使用液体火箭发动机可靠性评估方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(5): 498-505.
Ga Y J, Li W Z, Song Q Q, et al. Analysis of reliability evaluation method of reusable liquid rocket engine[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(5): 498-505.
- [22] 谭永华, 潘匡志, 周康, 等. 变推力液体火箭发动机研究进展[J]. 中国航天, 2023(5): 24-31.
Tan Y H, Pan K Z, Zhou K, et al. Types and research progress of variable thrust liquid rocket engines[J]. Aerospace China, 2023(5): 24-31.
- [23] 谭永华, 杜飞平, 陈建华, 等. 液氧煤油高压补燃循环发动机深度变推力系统方案研究[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1201-1209.
Tan Y H, Du F P, Chen J H, et al. Study on deep variable thrust system of LOX/kerosene high pressure staged combustion engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(6): 1201-1209.
- [24] 汪广旭, 谭永华, 陈建华, 等. 液体火箭发动机非稳态燃烧过程对其稳定性的影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(4): 929-936.
Wang G X, Tan Y H, Chen J H, et al. Effects of unsteady combustion process on combustion instability of liquid rocket engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(4): 929-936.
- [25] 曹伟, 郭康康, 任玉彬, 等. 气氧/甲烷矩形火箭发动机横向不稳定燃烧“热-声-涡”耦合机理[J]. 航空动力学报, 2025, 40(11): 370-380.
Cao W, Guo K K, Ren Y B, et al. Mechanism of "heat-acoustic-vortex" coupling for transverse unstable combustion in an O₂/CH₄ rectangle rocket combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(11): 370-380.
- [26] Chato D J. Experimentation for the maturation of deep space cryogenic refueling technologies: NASA/TP-2008-214929[R]. Washington, D. C.: NASA, 2008: 1-96.
- [27] Schwarz R, Solari M, Razgus B, et al. Preliminary design of the hybrid navigation system for the CALLISTO RLV demonstrator[C]// Proceedings of the 8th EUCASS. Madrid: EUCASS Association, 2019: 1-20.
- [28] Gallaher M, Coughlin D, Krupp D. A guidance and control assessment of three vertical landing options for RLV[C]// Guidance, Navigation, and Control Conference. San Diego, CA, USA. AIAA, 1996: AIAA1996-3702.
- [29] 韦常柱, 琚啸哲, 徐大富, 等. 垂直起降重复使用运载器返回制导与控制[J]. 航空学报, 2019, 40(7): 192-215.
Wei C Z, Ju X Z, Xu D F, et al. Guidance and control for return process of vertical takeoff vertical landing reusable launching vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(7): 192-215.
- [30] 张志国, 马英, 耿光有, 等. 火箭垂直回收着陆段在线制导凸优化方法[J]. 弹道学报, 2017, 29(1): 9-16.
Zhang Z G, Ma Y, Geng G Y, et al. Convex optimization method used in the landing-phase on-line guidance of rocket vertical recovery[J]. Journal of Ballistics, 2017, 29(1): 9-16.
- [31] 安泽, 熊芬芬, 梁卓楠. 基于偏置比例导引与凸优化的火箭垂直着陆制导[J]. 航空学报, 2020, 41(5): 242-255.
An Z, Xiong F F, Liang Z N. Landing-phase guidance of rocket using bias proportional guidance and convex optimization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(5): 242-255.
- [32] 张洪华, 关铁峰, 黄翔宇, 等. 嫦娥三号着陆器动力下降的制导导航与控制[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(4): 377-384.

- Zhang H H, Guan Y F, Huang X Y, et al. Guidance navigation and control for Chang'E-3 powered descent[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(4): 377-384.
- [33] Wilken J, Callsen S, Daub D, et al. Combined cryogenic insulation and thermal protection systems for reusable stages[C]//Proceedings of the 9th EUCASS. Lille: EUCASS Association, 2022: 1-14.
- [34] 姚草根, 吕宏军, 贾新朝, 等. 重复使用金属热防护系统研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2011, 41(2): 1-4.
Yao C G, Lyu H J, Jia X C, et al. Reusable metallic thermal protection system[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2011, 41(2): 1-4.
- [35] Macés-Hernández J A, Seelbinder D, Theil S. Design of flight control systems for RLVs with structural flexibility: Application to the CALLISTO vehicle[C]//IAF Astrodynamics Symposium. Milan, Italy. International Astronautical Federation (IAF), 2024: 195-205.
- [36] Rogowski R S. Structures integrated vehicle health management for third generation reusable launch vehicles[C]//Space Transportation Technology Workshop: Propulsion Research and Technology. Washington, D.C.: NASA, 2000: 1-12.
- [37] 郑正路, 徐振亮, 汪小卫, 等. 可重复使用运载火箭箭体结构检测及维护方法研究[J]. *航天制造技术*, 2016(1): 68-70.
Zheng Z L, Xu Z L, Wang X W, et al. Research on detection and maintenance method for reusable launch vehicle structure[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2016(1): 68-70.
- [38] 武晓欣, 贾洁羽, 邢理想, 等. 重复使用液体火箭发动机原位无损检测技术应用及展望[J]. *火箭推进*, 2024, 50(1): 46-56.
Wu X X, Jia J Y, Xing L X, et al. Application and prospect of *in-situ* nondestructive testing of reusable liquid rocket engine[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2024, 50(1): 46-56.
- [39] Prince F A, Hamaker J W. The launch systems operations cost model[C]//3rd Annual Joint ISPA/SCEA International Conference. Washington, D.C.: NASA, 2001: 1-12.
- [40] Heppenheimer T A. The space shuttle decision: NASA's search for a reusable space vehicle: NASA SP-4221[R]. Washington, D.C.: NASA, 1999: 1-488.
- [41] Pielke R, Byerly R. Shuttle programme lifetime cost[J]. *Nature*, 2011, 472(7341): 38.
- [42] Stappert S, Wilken J, Calabuig G J D, et al. Evaluation of parametric cost estimation in the preliminary design phase of reusable launch vehicles[C]//Proceedings of the 9th EUCASS. Lille: EUCASS Association, 2022: 1-13.
- [43] NASA. Commercial orbital transportation services: A new era in Spaceflight: NASA/SP-2014-617[R]. Washington, D.C.: NASA, 2014: 1-146.
- [44] Freeman C. Technology, Policy, and Economic Performance: Lessons from Japan[M]. London: Pinter Publishers, 1987: 1-155.
- [45] Nelson R R. National Innovation Systems: A Comparative Analysis[M]. New York: Oxford University Press, 1993: 1-541.
- [46] Weinzierl M. Space, the final economic frontier[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2018, 32(2): 173-192.
- [47] 沃尔特·艾萨克森. 埃隆·马斯克传[M]. 孙思远, 刘家琦, 译. 北京: 中信出版社, 2023: 1-589.
Isaacson W. Elon Musk[M]. New York: Simon & Schuster, 2023.
- [48] 牛枫, 王宸, 陈金宝, 等. 可重复使用运载火箭回收着陆装置研究进展[J]. *宇航学报*, 2025(5): 825-837.
Niu C, Wang C, Chen J B, et al. Review of the recovery system of reusable launch vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2025(5): 825-837.
- [49] Krummen S, Desmariaux J, Saito Y, et al. Towards a reusable first stage demonstrator: CALLISTO—Technical Progresses & Challenges [C]//72nd International Astronautical Congress. Dubai: IAF, 2021: 1-15.
- [50] Sagliano M, Hernández J A M, Fari S, et al. Unified-loop structured H-infinity control for aerodynamic steering of reusable rockets[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2023, 46(5): 815-837.
- [51] 龙乐豪, 蔡巧言, 王飞, 等. 重复使用航天运输系统发展与展望[J]. *科技导报*, 2018, 36(10): 84-92.
Long L H, Cai Q Y, Wang F, et al. Development of reusable space transportation technologies[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(10): 84-92.
- [52] Wang X J. Prospects for the future development of China's space transportation system[J]. *Space: Science & Technology*, 2021, 2021: 2021/9769856.
- [53] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 1-576.
Zhang G T. High-Pressure Staged-Combustion Liquid Oxygen-Kerosene Rocket Engines[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 1-576.
- [54] 宋征宇, 吴义田, 徐珊妹, 等. 长征八号: 长征火箭系列商业化与智慧化的先行者[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2021, 8(1): 3-16.
Song Z Y, Wu Y T, Xu S S, et al. LM-8: The pioneer of long March rocket series on the innovations of commercialization and intelligence [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2021, 8(1): 3-16.

- [55] 宋征宇, 黄兵, 汪小卫, 等. 重复使用航天运载器的发展及其关键技术[J]. 前瞻科技, 2022, 1(1): 62-74.
Song Z Y, Huang B, Wang X W, et al. Development and key technologies of reusable launch vehicle[J]. Science and Technology Foresight, 2022, 1(1): 62-74.
- [56] 王辰, 张宏剑, 闫伟, 等. 重复使用运载火箭栅格舵选型设计与工艺方案研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(1): 51-61.
Wang C, Zhang H J, Yan W, et al. Research on design and process program for grid fin of reusable rocket[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(1): 51-61.
- [57] 刘明奇, 韩忠华, 杜涛, 等. 面向运载火箭栅格舵的最优操纵效率特征与宽速域气动优化设计方法[J]. 航空学报, 2024, 45(20): 258-277.
Liu M Q, Han Z H, Du T, et al. Optimal control efficiency characteristics and wide-speed-range aerodynamic design optimization method for grid fins of launch vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(20): 258-277.
- [58] 贾洪印, 张培红, 赵炜, 等. 火箭子级垂直回收布局气动特性及发动机喷管影响[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 28-39.
Jia H Y, Zhang P H, Zhao W, et al. Aerodynamic characteristics of vertical recovery of rocket sub-stage and influence of engine nozzle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 28-39.
- [59] 邓思超, 汪小卫, 徐振亮, 等. 基于栅格舵和滑翔翼的垂直起降火箭再入返回气动特性[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(5): 483-491.
Deng S C, Wang X W, Xu Z L, et al. An analysis of aerodynamic characteristics of reusable rocket's first sub-stage with grid rudder and glider[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(5): 483-491.
- [60] Gerschenkron A. Economic Backwardness in Historical Perspective[M]. Cambridge, Mass.: Belknap Press of Harvard University Press, 1962: 1-456.
- [61] Abramovitz M. Catching up, forging ahead, and falling behind[J]. The Journal of Economic History, 1986, 46(2): 385-406.
- [62] 路风. 走向自主创新 寻求中国力量的源泉[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2006: 1-482.
Lu F. Towards Indigenous Innovation: Seeking the Source of China's Strength[M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2006: 1-482.
- [63] 国务院. 关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见: 国发〔2014〕60号[Z]. 2014-11-26.
State Council. Guiding opinions on innovating investment and financing mechanisms in key fields to encourage social investment: Guo Fa No. 60[Z]. 2014-11-26.
- [64] 国家发展改革委, 财政部, 国防科工局. 国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015—2025年)[Z]. 2015.
National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, SASTIND. Medium- and long-term development plan for national civil space infrastructure (2015—2025)[Z]. 2015.
- [65] 国防科工局, 中央军委装备发展部. 关于促进商业运载火箭规范有序发展的通知[Z]. 2019.
SASTIND, Equipment Development Department of the CMC. Circular on promoting the regulated and orderly development of commercial launch vehicles[Z]. 2019.
- [66] Tronchetti F, Liu H. The 2019 notice on promoting the systematic and orderly development of commercial carrier rockets: The first step towards regulating private space activities in China[J]. Space Policy, 2021, 57: 101432.
- [67] 国家航天局. 国家航天局推进商业航天高质量发展安全发展行动计划(2025—2027年)[EB/OL]. (2025-11-25)[2026-09-06]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c10719382/content.html>.
China National Space Administration. Action Plan for Promoting High-Quality and Safe Development of Commercial Aerospace (2025-2027)[EB/OL]. (2025-11-25)[2026-09-06]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c10719382/content.html>.
- [68] 陈劲, 阳镇, 朱子钦. 新型举国体制的理论逻辑、落地模式与应用场景[J]. 改革, 2021(5): 1-17.
Chen J, Yang Z, Zhu Z Q. The theoretical logic, implementation mode and application scenario of the new type of national system[J]. Reform, 2021(5): 1-17.
- [69] 李瑞, 梁正, 薛澜. 技术演化理论视角下新型举国体制分类与边界[J]. 科学学研究, 2024, 42(6): 1225-1233, 1277.
Li R, Liang Z, Xue L. The taxonomy and boundaries for the New Whole Nation based on the technological evolution theory[J]. Studies in Science of Science, 2024, 42(6): 1225-1233, 1277.
- [70] Lundvall B.-Å. National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning[M]. London: Pinter, 1992: 1-342.
- [71] Han Y X, Chen Z, Hu Y X, et al. A PIE analysis of China's commercial space development[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2023, 10: 744.
- [72] 龙威, 徐拓, 刘晓, 等. 关于我国商业运载火箭发展的思考[J]. 军民两用技术与产品, 2019(7): 40-43.

- Long W, Xu T, Liu X, et al. Thoughts on the development of China's commercial launch vehicle[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2019(7): 40-43.
- [73] Xin L. China catches up in commercial space: An interview with Ji Wu[J]. *National Science Review*, 2022, 9(7): nwac065.
- [74] 郭莎莎, 马玉伟, 张宁, 等. 2024年中国商业航天发展回顾与展望[J]. *中国航天*, 2025(1): 60-67.
- Guo S S, Ma Y W, Zhang N, et al. Progress and prospects of China commercial space in 2024[J]. *Aerospace China*, 2025(1): 60-67.
- [75] 杨浩亮, 王瑀宁, 窦晓华, 等. "力箭"一号技术与创新[J]. *中国航天*, 2023(3): 14-18.
- Yang H L, Wang Y N, Dou X H, et al. Development status and innovation of kinetica-1 solid launch vehicle[J]. *Aerospace China*, 2023(3): 14-18.
- [76] 杨浩亮, 廉洁, 朱永泉, 等. "力箭"二号技术发展与创新应用研究[J]. *中国航天*, 2026(5): 6-13.
- Yang H L, Lian J, Zhu Y Q, et al. Technology development and innovative application of PR-2 carrier rocket[J]. *Aerospace China*, 2026(5): 6-13.
- [77] 杨浩亮, 王英诚, 张延瑞, 等. 力箭一号分离系统设计与验证[J]. *载人航天*, 2024, 30(1): 81-88.
- Yang H L, Wang Y C, Zhang Y R, et al. Design and verification of separation system of PR-1[J]. *Manned Spaceflight*, 2024, 30(1): 81-88.
- [78] 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.
- Yang H L, Yang Y Q, Lian J, et al. Key technologies and innovations for commercial reusable launch vehicles[J]. *Aerospace China*, 2022(11): 8-14.
- [79] 黄朝峰, 张超, 李金格, 等. 我国商业航天发展面临的形势与挑战[J]. *中国科学院院刊*, 2025, 40(11): 1891-1901.
- Huang C F, Zhang C, Li J G, et al. Situation and challenges in development of China's commercial aerospace[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2025, 40(11): 1891-1901.
- [80] 李阳, 黄朝峰, 胡天恩. 新型举国体制推动军民科技协同创新: 内在逻辑与实践进路[J]. *中国科技论坛*, 2024(3): 6-16.
- Li Y, Huang C F, Hu T E. The new national system promotes the collaborative innovation of military-civilian science and technology: Internal logic and practical approach[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2024(3): 6-16.
- [81] Shraddha C, Priyadarshi P, Ghate D P. A survey of launch vehicle recovery techniques[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2025, 155: 101092.
- [82] 高朝辉, 张普卓, 刘宇, 等. 垂直返回重复使用运载火箭技术分析[J]. *宇航学报*, 2016, 37(2): 145-152.
- Gao Z H, Zhang P Z, Liu Y, et al. Analysis of vertical landing technique in reusable launch vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(2): 145-152.
- [83] Bussler L, Sippel M. Comparison of return options for reusable first stages[C]//21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference. Xiamen, China. AIAA, 2017: AIAA2017-2137.
- [84] Kim Y, Lee H J, Roh T S. Analysis of propellant weight under re-entry conditions for a reusable launch vehicle using retropropulsion[J]. *Energies*, 2021, 14(11): 3210.
- [85] 田保林, 于海涛, 高海波, 等. 一种垂直起降运载器支腿构型设计与尺度优化[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(15): 33-44.
- Tian B L, Yu H T, Gao H B, et al. Configuration design and scale optimization of the support legs of a vertical take-off and landing vehicle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(15): 33-44.
- [86] 李元恒, 张宏剑, 宋征宇, 等. Configuration optimization and design of vertical landing mechanisms of reusable launch vehicles[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2022, 9(5): 470-476.
- Li Y H, Zhang H J, Song Z Y, et al. Configuration optimization and design of vertical landing mechanisms of reusable launch vehicles[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(5): 470-476.
- [87] Stappert S, Singh S, Funke A, et al. Developing an innovative and high-performance method for recovering reusable launcher stages: The in-air capturing method[J]. *CEAS Space Journal*, 2024, 16(4): 411-426.
- [88] U.S. Government Accountability Office. National security space launch: Increased commercial use of ranges underscores need for improved cost recovery: GAO-25-107228[R]. Washington, D.C.: GAO, 2025: 1-55.
- [89] 龙乐豪, 王国庆, 吴胜宝, 等. 我国重复使用航天运输系统发展现状及展望[J]. *国际太空*, 2019(9): 4-10.
- Long L H, Wang G Q, Wu S B, et al. Development status and prospect of reusable space transportation system in China[J]. *Space International*, 2019(9): 4-10.

A Comparative Study on the Engineering Pathways of Reusable Rockets in China and the United States

WANG Jingyan¹, LI Chao² XIE Jixiao³, HOU Yude^{1*}

1. Institute for the History of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Yuntu Semiconductor Research Institute (Hainan) Co., Ltd., Hainan 570125, China;

3. Yunjing Innovation (Beijing) Aerospace Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China

Highlights

Shuttle reflight ≠ economical reuse; full-life cost hit ~1.45 billion USD/flight.

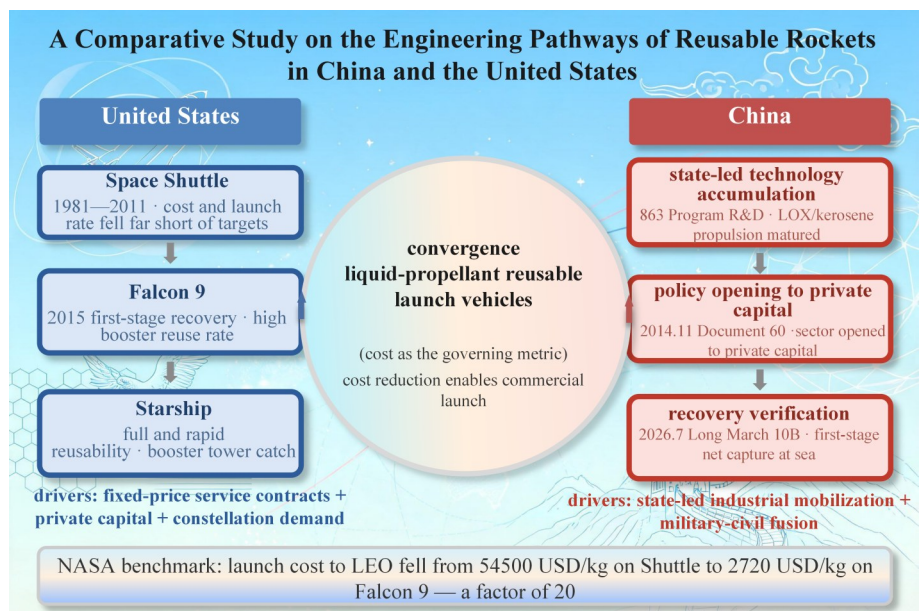
SpaceX's win was institutional plus technological, not mature-tech recombination.

China's reuse path: policy opening, private capital, civil-military fusion.

U. S. and Chinese paths diverge in demand yet converge on liquid reuse.

The competition metric is cost per kilogram; China must reach reflight.

Graphical Abstract



Abstract: Reusable launch vehicles (RLVs) have become the core variable behind the systemic decline in launch cost that drives the current commercial-spaceflight boom; on a list-price and maximum-payload basis, cost per kilogram to low Earth orbit has fallen to roughly one-twentieth of the Space Shuttle era. Taking launch-cost reduction as its main thread, this paper treats the reusable rocket as a cost-driven system rather than a single technology, and compares the engineering pathways of RLVs in China and the United States. It asks why two countries that started from fundamentally different institutional bases converged on liquid, reusable rockets as the dominant technical route, and what organizational, procurement and financial mechanisms—beyond engineering skill—decide whether technical reflight becomes economical reuse. The aim is to draw lessons for late-comer catch-up in high-tech industries.

Adopting a historical-comparative and systems-engineering perspective, the study draws on primary and authoritative sources—NASA cost-accounting studies (Pielke and Byerly, *Nature*, 2011; Hepplewhite, NASA SP-4221), SpaceX disclosure documents (Form S-1), Chinese policy texts (Guofa (2014) No. 60, the 2015—2025 civil-space infrastructure plan, the 2024 Government Work Report) and official mission announcements; media reports serve only as supplementary material and are never the sole basis for cost or milestone claims. The analysis proceeds in five moves: the value of reuse, the constituent systems of an RLV, the U. S. path (Shuttle to Falcon 9), the Chinese path (state accumulation, policy opening, private capital, recovery demonstration), and a two-country comparison followed by an outlook. A five-level maturity ladder—controlled return, complete recovery, condition assessment and limited refurbishment, reflight of the same hardware, and high-frequency fleet operation—situates each actor, while the lenses of national innovation systems and late-comer catch-up frame the symmetric institutional comparison.

Four findings stand out. (1) The Space Shuttle showed that technical reflight is not economical reuse: its full-lifecycle cost

reached about 1.45 billion USD/flight, a magnitude corroborated by both NASA and GAO cost studies, whereas Falcon 9 has cut cost about 2720 USD/kg. (2) SpaceX's breakthrough was at once institutional—NASA's shift from "doing" space to "buying" services through milestone-based COTS procurement—and technological, spanning grid fins, landing legs, deeply throttled and restartable engines, stainless-steel airframes and catch-tower recovery, rather than a mere recombination of mature technology. (3) China's reusable-rocket development was driven by external demonstration, market-access liberalization (enacted about a year before Falcon 9's December-2015 recovery), private-enterprise growth, financial-capital inflow and state-owned technological accumulation, all within a civil-military fusion and new-system-of-national-missions framework; local governments amplified it through industrial parks, industrial funds and anchored orders. (4) The two pathways diverge along five symmetric dimensions—demand maturity, iteration mechanism, stage of progress, industrial organization and civil-military relations—yet converge on liquid reusable rockets; as a system, an RLV's economic result is decided as much by organization, procurement and mission demand as by technology.

The vertical-landing and sea-based net-capture recovery schemes differ mainly in propellant reservation, structural dead weight and recovery-platform support, and neither is superior a priori; the benchmark of competitiveness should be operational—reflights of the same hardware, turnaround interval between missions and cost per unit payload—rather than the recovery manoeuvre itself. For China, the next hurdle is to move from recovery success to reflight operation and ultimately to high-frequency, low-margin fleet service, while the United States advances toward full-vehicle reuse and higher-cadence fleet operations; cost per kilogram, not the spectacle of a single launch, is the ultimate metric. The comparison offers policy implications for nurturing commercial spaceflight through the interplay of market mechanisms and the new system of national missions, and a reference for late-comer catch-up in high-tech industries. A limitation is that several Chinese commercial-rocket indicators remain undisclosed, so cross-country quantification is necessarily partial; as flight data accumulate, a fuller empirical comparison will become possible.

Keywords: reusable launch vehicle; commercial spaceflight; vertical recovery; launch cost; liquid oxygen/methane engine; systems engineering; engineering pathway

Received: 10 Aug. 2026; **Accepted:** 11 Sep. 2026; **Published online:** 28 Sep. 2026