

引用格式:张超, 时千舒, 孟斌斌, 等. 超越创新悖论:低成本推动商业航天高质量发展的实践与思考. 中国科学院院刊, 2025, 40(11): 1902-1913, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250821007.

Zhang C, Shi Q S, Meng B B, et al. Beyond innovation paradox: Practices and reflections on promoting high-quality development of commercial aerospace with low costs. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40(11): 1902-1913, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20250821007. (in Chinese)

超越创新悖论：低成本推动商业航天高质量发展的实践与思考

张超^{1,2,3} 时千舒⁴ 孟斌斌^{5,6} 程泉⁷ 赵军^{1*} 吴伟韬^{5,6}

1 上海交通大学 安泰经济与管理学院 上海 200030

2 上海交通大学 国家战略研究院 上海 200030

3 上海交通大学 行业研究院 上海 200030

4 北京理工大学 管理学院 北京 100081

5 军事科学院国防科技创新研究院 北京 100071

6 智能博弈与决策实验室 北京 100071

7 中国信息通信研究院 北京 100083

摘要 商业航天作为国家战略性新兴产业，其低成本高质量发展对抢占太空经济制高点、培育新质生产力至关重要。当前，以美国太空探索技术公司（SpaceX）为代表的国际企业通过技术突破和模式创新已形成领先优势，对我国航天安全与发展构成严峻挑战。文章在分析商业航天发展演进历程的基础上，深入剖析传统航天产业面临的“低成本-高质量”创新悖论及其成因。在此基础上，通过对国际商业航天企业打破这一创新悖论的经验分析，总结出技术架构创新、商业模式驱动的创新范式、科技管理模式变革等突破路径，为我国商业航天发展实践提供启示。文章进一步指出，我国商业航天仍面临顶层规划系统性不足、发展理念与市场脱节、核心技术能力存在短板、产业创新生态建设滞后等问题，亟须通过强化顶层设计与标准统一、树立成本优先发展理念、推动关键技术组织攻关、健全生态要素保障等多维度举措，为商业航天领域降本提质提供有力支撑。

关键词 商业航天，低成本技术，商业模式，创新生态，创新悖论

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20250821007

CSTR 32128.14.CASbulletin.20250821007

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金面上项目（72474209），国家自然科学基金青年科学基金项目（72102222）

修改稿收到日期：2025年10月29日

商业航天作为国家战略性新兴产业，是我国从“航天大国”迈向“航天强国”的关键支撑，是衡量一个国家科技实力与综合国力的重要标志，其低成本高质量发展对于抢占太空经济制高点、培育新质生产力和新质战斗力具有关键意义^[1,2]。在全球航天经济中，商业航天占比在2022年就已高达78%，且未来或将以4.7%的复合年均增长率持续增长^①。由此可见，商业航天已成为世界航天产业的主要构成，在航天经济增长方面发挥着越来越大的作用^[3]。在此过程中，以美国太空探索技术公司（SpaceX）为代表的企业凭借技术与模式创新主导市场，推动全球商业航天领域的战略布局加速展开，而轨道频谱资源“先到先得”的国际规则更让竞争态势日趋白热化^[4]。

一直以来，传统航天都面临着“低成本与高质量难以协同发展”的创新悖论。然而，伴随美国SpaceX“猎鹰”9号运载火箭一子级回收实验的成功，这一创新悖论迎来关键突破。SpaceX不但以“第一性原理”为核心重构技术架构，如通过拆解火箭发射成本构成，实现全球首次对制造复杂昂贵的梅林发动机的准确回收再使用；同时搭配一套独特高效的研发、生产与组织管理模式^[3]，成功破解了商业航天低成本与高质量的协同难题。相较而言，我国运载火箭在单位发射成本、低轨通信卫星平均造价等方面存在明显的成本差距^[5,6]。究其原因，我国商业航天产业仍面临研发周期长、制造成本高、发射能力弱等问题，难以满足低轨星座“高密度、低成本”的发射需求^[6]。因此，如何打破这一创新悖论，推动商业航天走出具有中国特色、符合中国国情的低成本高质量创新之路，成为当下亟待回答的问题。

近年来，我国高度重视商业航天发展，将之视为“新质生产力”和“新增长引擎”的重要载体，并在

2024年首次写入《政府工作报告》中，凸显其重要性。当前，国际上已探索形成兼顾低成本和高质量的商业航天发展创新路径，在对我国安全和发展利益构成威胁的同时，也对我国发展商业航天产业提供了有益借鉴。然而，现有研究多聚焦于国际商业航天发展模式的经验总结，尚未对我国如何打破创新悖论进行系统性深入分析。为此，本文系统梳理商业航天低成本发展之路，总结国际成功经验，基于我国商业航天发展现状和制约因素，提出针对性对策建议。

1 航天产业创新悖论下商业航天的发展

1.1 航天产业“低成本-高质量”创新悖论成因分析

(1) 传统航天预先研究路径固定缺乏敏捷开发能力。传统航天采用瀑布式开发模式，严格遵循可行性论证、方案设计、初样/正样研制、飞行试验等线性阶段，技术状态高度固化^[7]。例如，美国波音公司研制“德尔塔4号”火箭时严格按阶段推进，虽然降低了后期风险，但前期设计阶段投入巨大且难以调整，无法快速响应技术迭代需求，导致研发效率与成本控制难以平衡。

(2) “保证完成任务”模式限制产品快速迭代升级。传统航天承担的国家重大项目往往具有显著政治与社会意义，在“保成功”的压力下，需要投入大量资源进行反复测试和验证^[7]。同时，“如果可以运行就不要改变它”的工程理念，叠加严格的变更审批流程，导致产品技术状态僵化。例如，“哥伦比亚号”航天飞机返回地球过程中发生解体造成7名航天员遇难之后，美国国家航空航天局（NASA）在“二代龙飞船”项目研发过程中严格把控各种关键技术方案和研发里程碑，尤其在“乘员损失率”参数要求远高于所有人类已有的载人航天器标准，这一近乎“变态”

① “新质生产力”系列(六):无垠星空:商业航天投资主题研究.(2024-08-19)[2025-10-29]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202408191639330125_1.pdf?1724084096000.pdf.

的安全性要求导致研发成本不断攀升^[8]。

(3) “等级式”金字塔创新管理模式限制研发效率。传统航天机构或企业一般采用“等级式”金字塔管理架构^[4]，组织结构较为“臃肿”、管理链条长、管理层次多。也正因如此，组织内跨部门协作机制缺失、沟通壁垒森严、运转效率低下，在一定程度上抑制了研发效能^[7]。例如，NASA层级式组织架构的官僚化流程压制了来自基层的风险警告，从而导致“挑战者号”和“哥伦比亚号”航天飞机事故^[9]。再如，NASA反思近地天体项目研发低效是因为单一项目主管管理模式使研究活动松散割裂，且缺乏整体监督、明确目标与里程碑，最终导致项目推进严重受阻^[10]。

1.2 创新悖论之下商业航天的发展演进历程

(1) 航天商业化：政府主导模式的市场化破冰。冷战时期，美国传统航天产业长期由政府主导，以国家战略需求为核心，成本居高不下。随着航天技术的逐渐成熟以及财政压力的不断增加，美国政府在1984年出台了《商业航天发射法案》(Commercial Space Launch Act of 1984)，首次向私营企业开放发射市场，推动政府设施与航天企业向商业市场开放。其进程以国际通信卫星组织的企业化转型与国际海事卫星组织的私有化改革为两大里程碑，标志着国际卫星通信广播领域形成成熟的商业化运营体系，政府作为大客户按照商业规律参与采购，为后续产业变革奠定制度基础^[11]。

(2) 商业航天：市场驱动的全链条创新。航天商业化虽打破了政府主导的传统垄断格局，但彼时传统航天企业仍以政府订单为主要收入来源。然而，随着低轨卫星星座、太空旅游等新兴需求爆发，以SpaceX为代表的企业重塑了商业模式，推动了商业航天产业变革^[4]。从全球视野看，商业航天标志着航天商业化进程进入新阶段^[11]，其显著特征是产业链纵向深度拓展。传统航天企业早期主要服务于国家任务，业务集中于卫星制造与发射环节，无需涉足卫星运营、通信

服务、遥感数据处理等下游应用领域。在此背景下，商业航天推动了产业链重构。一方面，头部企业通过垂直整合强化核心竞争力，如SpaceX实现从火箭制造到星链运营的全链条覆盖；另一方面，传统航天企业积极向卫星运营、通信服务、遥感数据处理等下游延伸^[4]，不仅加速了技术成果转化，更推动整个产业向高效化、市场化方向升级。

(3) “商业航天+”：跨域融合的生态重构。随着航天技术的持续突破和市场需求的深度释放，商业航天进入“航天+”的生态创新阶段。此时，航天技术与其他产业深度融合，催生出全新的商业模式和应用场景。例如：SpaceX通过“星链”系统实现卫星互联网与5G通信技术整合^[1]，服务覆盖全球超过150个国家和地区；Virgin Galactic公司依托“太空船二号”推动亚轨道旅游商业化^[7]；Planetary Resources公司布局小行星采矿，探索地月经济资源利用路径^[1]。其驱动力源于航天技术溢出效应与数字经济催生的新业态需求，通过“航天+通信/旅游/制造”模式重构太空经济，形成“地-空-天”一体化产业生态^[4,11]，标志着人类太空活动进入全新阶段^[1,4]。

1.3 全球商业航天发展现状与趋势：低成本创新的突围语境

(1) 美国商业航天强势布局抢占发展先机。1984年《商业航天发射法案》出台后，美国秉持“穷尽其用、只建必建、能商则商”原则，构建“军民商盟”混合太空体系和一体化战略布局，将民商资源作为传统航天的关键补充。2024年，美国政府发布《2024年国防部商业航天一体化战略》(2024 DoD Commercial Space Integration Strategy)，将商业航天纳入国家安全太空架构。在此背景下，SpaceX成为行业标杆，其通过在卫星制造成本效率、单箭运力、火箭回收等关键环节的低成本，已处于全球绝对领先水平。以火箭发射价格为例，SpaceX“猎鹰”9号的发射价格远低于欧洲、俄罗斯(表1)。

表1 美国、欧洲、俄罗斯运载火箭发射价格

Table 1 Launch prices for launch vehicles from the United States, Russia, and Europe

性能指标	美国			欧洲	俄罗斯	
	“宇宙神”5	“德尔他”4H	“猎鹰”9	“阿里安”5	联盟	质子
GTO运载能力(吨)	8.9	14	约11	10.5	3.25	6.27
LEO运载能力(吨)	—	28	约11	21	8.2	—
GTO运载价格(万元/千克)	12	16	7.8	8.4	16	6.7
LEO运载价格(万元/千克)	5.6	8	2.6	—	6.3	—

注：GTO表示同步轨道，LEO表示近地轨道；数据为作者根据相关公开资料整理；“—”表示没有报道相关数据；信息检索的时间为2025年11月

Note: LEO stands for low Earth orbit, and GTO stands for geostationary orbit; The author has compiled relevant publicly available materials, “—” indicates no relevant data reported; retrieved in November 2025

(2) 低轨星座竞争激烈，低成本规模化部署成破局关键。轨道频谱资源稀缺且不可再生，但美国已凭借“先登先占，先占永得”的国际规则，在全球主要低轨卫星星座分布中以绝对数量优势占据了绝大多数空间（表2），而当前全球频率资源中大部分也已趋于饱和（表3）。若美国顺利实施SpaceX“星链”、亚马逊公司“柯伊伯”等星座计划，将占据超90%空间资源^[2]。这对我国商业航天突破创新悖论提出核心命题：如何以低成本控制为核心支撑，在短时间内实现大规模部署。也即如何既能通过成本优势形成数量规模以抢占轨位，又能依托技术可靠性保障长期运营，方能在资源争夺中占据主动。

(3) 大国角力呈现“一超多强”竞争格局，低成本能力成追赶关键。近些年，出于国防安全与国家战略需求，世界主要国家在争夺低轨卫星领域主导权方面愈演愈烈。例如，美国SpaceX“星链”截至2025年6月已部署超8 800颗卫星，构建起全球最大低轨卫星网络；欧洲议会推进“安全连接计划”（IRIS²），拟于2027年建成自主通信卫星群；俄罗斯推进“球体”项目，计划2024—2028年部署600余颗卫星；中国依托航天集团推进“星网”建设，规划部署近1.3万颗卫星。当前，受卫星制造、火箭发射等技术壁垒制约，全球低轨卫星“圈地战”主要集中于美国、中

国、俄罗斯及欧洲。从当前格局看，美国凭借先发优势与技术积累领先地位短期难以撼动，未来将呈现美国领跑、其他大国依托低成本创新加速追赶的“一超多强”态势^[11]，如表4所示。

2 低成本化推动商业航天高质量发展的国际经验

2.1 践行“第一性原理”的技术架构设计

(1) 攻克可回收多次复用的颠覆性技术。SpaceX对“第一性原理”的践行，核心是剥离行业传统经验、固有框架的束缚，直抵航天技术与工程的本质矛盾，并以此为起点重构技术架构。此前，传统航天默认“火箭是一次性运载工具”，核心原因是传统固体火箭燃料虽然存储便利但推力有限，且未思考其重复使用的可行性。马斯克用“第一性原理”直击本质，认为发射成本的核心损耗在于“箭体与发动机的一次性报废”，若能实现核心部件回收复用即可大幅降低成本，而这一目标的关键正是解决液体火箭的可控回收问题。在运载火箭回收复用方面，SpaceX主要专注于垂直反推技术^[12]，并实现了“猎鹰”9号一子级陆海基回收并创重复发射20次纪录^[5,13]。在多次复用技术方面，先进复合材料因轻质高强、耐烧蚀及热防护性能优异被广泛应用^[14]，“猎鹰”9号运用2 195铝锂

表2 全球主要低轨卫星星座情况
Table 2 World major low-orbit satellite constellations

国家	星座名称	运营公司	计划数量(颗)	轨道高度(km)	频段	最新情况
美国	Star Link (Gen1/Gen2A)	SpaceX	47 192	550—1 414	Ku/Ka/E	累计发射了 10 261 颗， 当前在轨总数 8 904 颗
	Amazon Leo (原名 Kuiper)	Amazon	3 236	590—639	Ku/Ka	累计发射了 155 颗， 当前在轨总数 153 颗
中国	千帆 (G60)	上海垣信卫星科技	≥15 000	500—2 000	Ku/Q/V	累计发射了 112 颗， 组网 108 颗
	国网 (GWA59/GW-A2)	中国星网	12 992	500 及以下和 1 145	Ku/Ka	累计发射 122 颗卫星
	鸿鹄三号	蓝箭鸿擎科技	10 000	600	Ku/Ka	—
	银河 Galaxy	银河航天	1 000	1 200	Q/V	累计发射 30 余颗
	金紫荆	香港航天科技 (USPACE)	112	550	—	累计发射卫星 12 颗
英国	吉林一号	长光卫星	138	500—700	—	累计发射了 220 颗， 当前在轨总数 140 颗
	OneWeb (Phase1/Phase2)	OneWeb	648	1 200	Ku/Ka	累计发射了 656 颗， 当前在轨总数 654 颗
加拿大	Telesat	Telesat	300	1 000—1 248	Ku/Ka	计划 2027 年底前 完成 156 颗发射
德国	KLED	KLEDConnect	624	1 050—1 425	Ka	—
印度	SpaceNet	Astrome	150	1 400	毫米波	—
俄罗斯	Yaliny	Yaliny	135	600	—	—
韩国	三星	三星	4 600	1 400	—	—

数据来源：作者根据相关公开资料整理；“—”表示没有报道相关数据；信息检索时间为 2025 年 11 月
Data source: The author has compiled relevant publicly available materials; “—”indicates no relevant data reported; retrieved in November 2025

合金使一子级结构质量比超 15^[1]，实现再入复用目标。

(2) 采用模块化和通用化总体研发思路。国际航天领域广泛采用模块化和通用化设计方法，通过标准化组件适配多样化载荷需求，显著降低发射成本。例如，SpaceX 系统贯彻“简单、低成本、高可靠”理念，“猎鹰”9 号一级火箭采用状态统一的梅林发动机，与“猎鹰重型”实现一级通用化，通过建立准流水线生产使得单台发动机成本降至 100 万美元^[12]。俄罗斯“安加拉”系列火箭采用公用芯级架构，搭载

RD-191M 大推力高压补燃液氧煤油发动机，通过配置不同数量的通用芯级实现“A1”至“A5”型号的运力梯度覆盖，在小型到大型火箭谱系中完整实现了设计通用化、模块化与组化。印度“月船 3 号”任务采用模块化分解设计，将着陆器、漫游车及推进模块拆解为 135 个标准化单元，其中 82 个单元交由本土中小企业协作生产，通过统一接口标准实现不同厂商部件的无缝适配^[15]。

(3) 借鉴敏捷开发推动系统级技术创新。国际商

表3 频率资源划分及使用情况
Table 3 Frequency resource allocation and usage

频段	频率范围	使用情况
L	1—2 GHz	资源几乎分配殆尽,主要用于地面移动通信、卫星定位、卫星移动通信及卫星测控等业务
S	2—4 GHz	资源几乎分配殆尽,主要用于雷达、地面移动、卫星移动通信及卫星测控等业务
C	4—8 GHz	近乎饱和,主要用于雷达、地面移动和卫星通信业务
X	8—10 GHz	主要用于雷达、地面通信和卫星通信等业务
Ku	10—14 GHz	实现覆盖范围和容量的平衡,已饱和,主要用于卫星通信和卫星电视直播业务
Ka	18—30 GHz	适合大容量传输和高数据吞吐量,正在被大量使用,主要用于卫星通信、地面移动、星间通信等业务
Q	37—52 GHz	开始进入商业卫星通信领域
THz	0.1—10 THz	正在开发

数据来源：作者根据相关公开资料整理
Data source: The author has compiled relevant publicly available materials

表4 2024年全球卫星研制数量榜单(前10位研制商)
Table 4 Global satellite development number ranking in 2024 (Top 10 developers)

排名	企业名称	所属国家	总数量/颗
1	SpaceX	美国	2 100
2	中国科学院微小卫星创新研究院	中国	52
3	中国空间技术研究院	中国	45
4	俄罗斯人造卫星公司(SPUTNIX)	俄罗斯	44
5	长光卫星技术有限公司	中国	37
6	行星公司(Planet)	美国	36
7	上海航天技术研究院	中国	25
8	浙江时空道宇科技有限公司	中国	21
9	一网公司(OneWeb)	英国	20
10	上海格思航天科技有限公司	中国	18

数据来源：根据《国际太空》报道整理
Data source: According to reports compiled by *International Space*

业航天领域通过敏捷开发提升复杂系统工程效率，SpaceX形成完整实践范式，被称为“用写代码的方式开发火箭”，有效降低成本提升效率^[7]：① 迭代开发。采用“规划—设计—制造—测试”循环路径，依托“猎鹰”1号经验递进发展出“猎鹰”9号、重型火箭及星舰系统，既缩短研制周期，又使成本较NASA预估降低82%—93%。② 重构优化。持续迭代升级关键

系统，如梅林发动机、“猎鹰”9号经多代改进实现性能跃升，间接优化单位运力成本。③ 自动化测试。首创发射台静态点火技术，30分钟内完成软件故障调试，使效率提升超90%，减少测试环节的时间与投入。④ 尽早试错机制。跳过传统冗长设计，以验证机迭代优化技术，如“猎鹰”9号回收技术经多次尝试成型，同时建立“失败即经验”的组织文化，降低无效研发成本。⑤ 消除重复策略。采用9台同款梅林发动机构成一级火箭，“龙”飞船客货舱高比例通用等设计，强化关键技术继承性，从研制与制造端直接控制成本。

(4) 本土技术自主与低成本替代技术突破。以印度为代表的发展中国家航天机构，通过核心技术自主化摆脱进口依赖，形成独特的低成本技术路径。例如，ISRO公司耗时15年自主研发的CE20液氧甲烷低温发动机，性能比肩欧洲“火神”火箭的“芬奇”发动机，但研发成本仅为后者的1/5，且通过简化涡轮泵结构与国产材料替代，使单台制造成本降至200万美元以下。在软件领域，采用本土开发的PraVaHa计算流体动力学(CFD)软件，成功替代ANSYS等商业软件，用于火箭气动设计与热防护模拟，每年节省超千万美元的软件授权费用，且本地化适配使模拟效率

提升20%^[16]。

2.2 商业模式驱动的创新范式与生态构建

(1) 提出商业概念引领技术发展形成商业闭环。国际经验显示，市场化竞争机制是技术创新的关键驱动力。美国政府通过政策引导和资金支持，培育出SpaceX、BlueOrigin等民营航天企业，打破了传统体制壁垒。在商业模式上，美国政府推行“按效付费”竞标机制，要求企业达成任务目标后方可获全额报酬，这一机制模式促使企业持续优化技术，SpaceX发射成功率因此远超行业平均水平^[13]。这种商业理念与技术发展深度融合的模式，形成了“需求牵引—技术突破—市场验证”的良性循环，为全球商业航天提供了范本。

(2) 构建开放模式实现低成本高可靠太空探索。国际商业航天领域的实践表明，构建开放协作模式是实现低成本可靠太空探索的有效路径，且差异化竞争可填补市场空白。例如，美国轨道科学公司“天蝎座α”火箭依托全球供应链整合，系统化复用经飞行验证的成熟子系统，将发射成本控制在了7 500万—8 000万美元的同时，更通过复用已验证技术模块以显著提升系统可靠性。该型号精准定位中等运力市场，填补了美国“米诺陶4”小型火箭与“德尔塔4”重型火箭间的空白，为中型卫星发射提供高性价比选择，同时借开放式技术集成缩短了研发周期。这一实践表明，在核心系统自主可控的前提下，适度开放供应链并整合全球优质资源，是平衡成本与可靠性的有效路径^[1]。

2.3 聚焦价值链优化的科技管理模式变革

(1) 采用纵向一体化高效的运营模式。国际商业航天领域通过价值链优化实现效率提升的典型案例表明，纵向一体化运营模式可显著降低交易成本。例如，SpaceX整合卫星、火箭、飞船及发射全产业链条，其9 000余名员工中90%为技术工程师，以仅占美国航天产业1.18%的人力资源承担了80%的发射任务^[5]。该公司采用两级扁平化管理架构，通过开放式

办公环境和数字化协同平台，实现跨部门高效协作^[5,6]。

(2) 创新理念实现快速迭代效率提升。在技术创新方面，国际领先企业普遍采用“测试驱动开发”模式。SpaceX则采用“尽早试错”的理念，通过频繁试错实现产品快速迭代，节省设计分析时间。工程师大卫·吉格称其模式建立在测试基础上而非长时间分析，其建立的“失败即学习”企业文化，鼓励工程师在可控范围内进行技术冒险，推动了发动机性能的大幅提升^[7]。

(3) 建立产业链供应链成本管理制度。SpaceX尤其重视运载火箭产业链成本分析和供应链成本管理，SpaceX运用管理会计学方法，构建覆盖发射业务规划、研发设计、采购制造、测试运营的全价值链成本管理体系，将产业链成本与财务体系融合，实现精细化管理。通过实时对比实际成本与计划成本差异，为决策层提供数据支撑^[5]。印度空间研究组织（ISRO）构建了“本土化供应链分级管控”体系，将135个火箭模块按技术难度分为核心级、关键级和普通级，其中普通级（如电缆组件）向中小企业公开招标，通过批量采购将零部件成本显著压低。

3 低成本推动我国商业航天发展的现状与制约因素

3.1 顶层规划不足缺乏统一的技术路线

我国商业航天正朝着低成本高质量方向推进，但其发展仍受到传统航天模式惯性的影响，顶层规划未形成面向商业模式的系统性部署，存在资源统筹与协同效率上的明显差距。主要制约因素在于：

(1) 顶层设计缺乏系统性规划和部署。各部门、地方政策交叉重叠，火箭与卫星接口标准不统一，产业链协同效率低下。例如，火箭与卫星研制标准不统一，导致产业链上下游兼容性差，推高研发与运营成本。

(2) **技术路线碎片化加剧了资源浪费。**技术路线分散，低水平重复研发现象突出，盲目跟风国际技术忽视本土化适配性。例如，在运载火箭领域，仅中型火箭的研制企业就多达10余家，大量企业扎堆在同一赛道进行同质化研发，造成资金、人才等资源的低效消耗与内耗；而对于液氧甲烷发动机、可回收等关键技术，却因资源已经被过度分散到其他渠道而投入不足，导致技术突破进程缓慢，形成“重数量轻质量、重跟风轻攻坚”的资源浪费困局。

3.2 企业发展理念与市场导向存在偏差

我国商业航天大多沿用传统航天“任务保障优先”的逻辑，发展理念与市场化需求脱节，与以成本控制、效率提升为核心的商业航天目标相比，存在显著的导向性偏差。突出表现为成本管控意识不足与市场化机制缺位。

(1) **成本意识薄弱且任务保障思想过重。**部分企业沿用传统航天思维、成本意识薄弱，“任务保障优先”等思想导致冗余设计过多，部分企业在卫星研制中沿用高可靠性但高成本的航天级元器件，而非采用经过验证的工业级，或车规级产品，增加了成本负担。

(2) **成本管理制度不健全造成效能低下。**部分企业发展过程中过度依赖国拨经费、投融资，市场化成本管控机制失效，同类卫星研制成本与国际产品相比差距明显，其根源在于发展理念与市场导向存在偏差，成本文化缺失、工具方法落后，导致技术可行性与经济合理性失衡，短期项目压力挤压长期成本优化空间。

3.3 技术能力系统性短板制约成本控制

我国商业航天技术体系仍较多依托传统航天基础，未形成适配商业场景的技术闭环，核心器件、转化应用等环节存在系统性短板，与低成本、高竞争力的商业航天目标相比，技术支撑能力存在明显缺口。

(1) **核心技术代差制约成本突破。**我国低成本商业航天在火箭发射、卫星制造等领域存在技术瓶颈，影响成本控制与市场竞争力。例如，在液体火箭发动机、可重复使用技术等方面，SpaceX第3代“猛禽”发动机单台海平面推力已高达269吨，我国类似产品的推力水平还不到其1/2。

(2) **技术应用与数字化转型滞后。**我国商业航天在新型推进系统等关键技术工程化进程缓慢；制造环节数字化基础薄弱，设计、生产和检测系统间协同不足，工业软件自主化程度较低，传统生产模式难以满足数字化转型需求。

(3) **系统级技术集成能力薄弱。**突出表现为模块化架构设计和多学科协同优化方面存在明显短板。例如，卫星载荷与平台未能实现高效一体化整合，导致功能冗余与性能缺失问题并存，箭体结构减重等关键设计难以达成系统最优效果。

3.4 适应低成本的产业创新生态待完善

当前，我国商业航天创新发展仍然以传统航天力量为主导，供应链、市场需求及人才结构均尚未形成适配商业逻辑的生态闭环，亟待突破。

(1) **商业航天供应链存在明显的“玻璃门”现象。**我国民营火箭企业发射次数较少，尚未形成大规模的发射能力和产业集群。例如，2024年中国民营火箭发射次数仅12次，仅占全国发射次数的18%；而SpaceX同年共执行134次发射任务，超过全球发射次数的50%。我国某公司的2025年发射服务项目因为民营火箭企业缺席，致使供应商报名不足3家而两次宣告流标。

(2) **主要依赖政府订单，有效需求不足。**政府和国家级航天计划（如卫星星座组网）仍是商业航天市场的核心客户，纯粹的商业订单（如商业卫星发射）规模和频率不足。例如，2025年，我国遥感数据服务市场规模达480亿元，其中的政府采购占比高达

63%^②。政府订单占比过高导致抗风险能力薄弱，叠加财政补贴收缩，较多商业航天企业现金流持续恶化而难以为继，市场从“政策驱动”真正转向“商业驱动”仍需时日。

(3) **人才梯队尚未成型，高端供给不足。**我国的民营航天企业还处于发展初期，核心团队人才来源比较单一，企业人才梯队储备和建设还很薄弱。国家队拥有深厚积累和人才密度，商业公司高薪挖人导致人力成本急剧上升。同时，新创公司过多，也稀释了有限的高端人才资源。尽管部分企业通过股权激励与扁平管理吸引院所骨干，但“国家队”仍凭发射场资源与重大工程背书维持人才稳定，商业航天从“挖人”转向“育人”仍需时日。

4 对策建议

4.1 加强顶层设计，推动火箭向通用化、产品化发展

(1) **加强统标统型。**由行业主管部门牵头，联合科研院所、骨干企业组建商业航天标准委员会，加快推进商业航天标准统标统型，规范箭体、动力系统、卫星、地面站、数据等关键领域标准统标统型，明确各环节技术参数与适配要求，实现生产制造“即插即用”、数据信息“共享共用”。

(2) **精简型号产品。**建立型号产品动态评估机制，将标准化率纳入企业资质评定、项目申报补贴的核心指标并与支持政策挂钩，按照“优中择优、成本可控、标准通用”的原则，精简火箭及动力系统等型号数量，重点支持具备批量生产能力、适配多场景需求的通用性型号发展，避免低水平重复建设。

(3) **推行货架产品。**建立货架产品航天级应用验证体系，参考 ISRO 做法，明确工业级、车规级零部

件、元器件等筛选标准、测试流程与适用场景，分批分类推动经验证的货架产品“上箭上星”应用，同步完善供应链保障机制，降低火箭、卫星研制生产成本。

4.2 转变发展理念，将低成本作为核心指标贯穿始终

(1) **推进成本考核评估。**建立“成本竞争力”的考核标准，将单位载荷的发射成本、卫星单星成本、全生命周期运维成本等指标，纳入到行业规范与项目管理要求；项目立项阶段设置成本“天花板”，研发过程强制开展价值工程分析与成本动态监测，验收阶段将实际成本与基准指标的偏差率作为核心的考核项。

(2) **加大降成本支持。**借鉴 SpaceX “质量-成本”精细化管控经验，整合地方财政、产业引导基金等资源设立商业航天成本优化专项基金，对通过技术创新、管理升级实现关键环节成本下降30%以上的企业给予政策倾斜，推动“技术可行”与“经济合理”协同发展。

4.3 组织技术攻关，加快低成本技术研发与应用示范

(1) **强化产学研协同创新。**聚焦商业航天“星箭场用管”各领域，强化产学研用协同创新，加快低成本制造、大运力/可重复火箭技术，高通量卫星、手机直连等关键核心技术攻关突破，激励原创性技术研发和专利布局。

(2) **加大政策支持力度。**相关主管部门出台专项政策，明确民营商业航天企业在火箭发射、卫星部署等方面的项目经费比例，建立常态化对接与资质认可机制，支持民营商业航天企业参与国家和军队重大工程建设。

^② 2025—2030 年中国遥感数据服务行业投资价值分析及发展趋势预测报告. [2025-11-12]. <https://www.chinairm.com/report/20250428/161616166.html?id=1918127&name=XuYuWei>.

(3) 拓展商业航天落地应用场景。在国防军事、应急救援、农业监测、海洋观测、能源勘探等领域持续开展商业航天技术应用示范，在资源禀赋好、产业生态聚集的区域试点建设国家级商业航天产业示范区，形成“研发—制造—发射—应用”闭环，加快推动商业航天技术成果转化和应用落地。

4.4 健全生态要素，多维度多渠道提供多元制度保障

(1) 打破产业链供应链垄断。建立“白名单+动态考核”的商业航天合格供应商体系，涵盖箭体结构、电子元器件、动力系统部件等关键领域，明确准入标准与考核细则；同时对核心部件推行“揭榜挂帅”攻关，培育多元化供应主体，以降低采购成本。

(2) 加强资源要素共享共用。整合行业资源建设商业航天共享服务平台，建设商业航天零部件、元器件共享库，提升数字化设计、制造、检测系统数据互通率，打造3—5家智能工厂示范标杆。

(3) 加大金融支持力度。建立优势商业航天企业科创板上市绿色通道，简化审核流程，明确针对航天企业的差异化审核标准；同时在气象、遥感等数据资源成熟的领域，开展卫星数据资产证券化试点，拓宽企业融资渠道。

(4) 注重人才培养。实施“商业航天人才专项计划”，支持高校与企业共建航天工程、卫星应用等相关专业，培育复合型人才，完善股权激励与长效激励机制，将激励与企业长期发展绑定，同时搭建人才交流平台，破解人才结构性短缺问题。

参考文献

- 1 Liu D, Yin Y, Xin C, et al. Research on the overall design of low cost launch vehicle. *Journal of Aerospace Science and Technology*, 2017, 5(1): 1-11.
- 2 刘怀伟, 陈静然. 我国商业航天发展趋势及建议. *科技中国*, 2024, (7): 39-42.
- 3 鹿艺, 肖尤丹. SpaceX创新机制及对我国航天技术发展的启示. *科技中国*, 2021, (6): 29-34.
- 4 于淼, 戴阳利, 张召才. 国外商业航天发展模式研究. *卫星应用*, 2017, (1): 23-31.
- 5 刁吉阳, 魏琪. SpaceX公司发展模式对我国低成本航天发射的启示. *军民两用技术与产品*, 2024, (4): 28-32.
- 6 李飞, 王郁景, 樊晓雨. SpaceX猎鹰火箭低成本探究及启示. *国防科技工业*, 2018, (10): 64-67.
- 7 郑丹. 从敏捷软件开发的视角看SpaceX公司的管理模式. *国际太空*, 2023, (10): 51-57.
- 8 田丰. 壮士断腕还是吹牛后食言? ——细数SpaceX这些年做过的抉择. *太空探索*, 2018, (3): 40-45.
- 9 McCurdy H E. NASA's organizational culture. *Public Administration Review*, 1992, 52(2): 189-192.
- 10 McClellan J. NASA report calls asteroid defense system a failure. *Tech Times*, 2014-07-17(01).

- 11 葛旭. 领跑太空 2.0 时代美国商业航天发展综述. 航空世界, 2016, (8): 50-65.
Song X. Overview of the development of U.S. commercial aerospace leading the Space 2.0 era. Aviation World, 2016, (8): 50-65. (in Chinese)
- 12 Foust J J. SpaceX's space-internet woes: Despite technical glitches, the company plans to launch the first of nearly 12,000 satellites in 2019. IEEE Spectrum, 2018, 56(1): 50-1.
- 13 曲忠芳. 商业航天探路者: 马斯克和 SpaceX. 中国经营报, 2024-10-14(03).
Qu Z F. Pioneer in commercial aerospace: Musk and SpaceX. China Business Journal, 2024-10-14(03).
- 14 何东晓. 先进复合材料在航空航天的应用综述. 高科技纤维与应用, 2006, (2): 9-11.
He D X. Review of the application of advanced composite in aviation and aerospace. Hi-Tech Fiber and Application, 2006, (2): 9-11. (in Chinese)
- 15 Shweta, Mishra P, Binu D, et al. Assembly, integration and testing of special tests of Chandrayaan-3// 2024 IEEE Space, Aerospace and Defence Conference (SPACE). Piscataway: IEEE, 2024: 334-337.
- 16 Government of India, Department of Space. Annual Report 2024-2025. Bengaluru: Indian Space Research Organisation (ISRO), 2025.

Beyond innovation paradox: Practices and reflections on promoting high-quality development of commercial aerospace with low costs

ZHANG Chao^{1,2,3} SHI Qianshu⁴ MENG Binbin^{5,6} CHENG Quan⁷ ZHAO Jun^{1*} WU Weitao^{5,6}

(1 Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2 National Institute of Strategic Studies, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

3 Industry Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

4 School of Management, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

5 Defense Innovation Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China;

6 Intelligent Gaming and Decision Laboratory, Beijing 100071, China;

7 China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100083, China)

Abstract Commercial spaceflight, as a national strategic emerging industry, is critical for seizing the high ground of the space economy and fostering new quality productive forces through its low-cost and high-quality development. Currently, international enterprises represented by SpaceX have gained a leading advantage through technological breakthroughs and business model innovations, posing severe challenges to China's aerospace security and development. This study first analyzes the evolutionary trajectory of low-cost development in commercial spaceflight, then delves into the "low-cost vs. high-quality" innovation paradox faced by the traditional aerospace industry and its root causes. Building on this analysis, it examines the experiences of international

*Corresponding author

commercial spaceflight companies in overcoming this paradox, summarizing breakthrough pathways such as technological architecture innovation, business model-driven innovation paradigms, and reforms in scientific and technological management models. The study further points out that China's commercial spaceflight sector faces severe challenges, including insufficient systemic top-level planning, a disconnect between development philosophies and market demands, gaps in core technological capabilities, and lagging industrial innovation ecosystem development. To address these issues, it emphasizes the urgent need for multidimensional measures, such as strengthening top-level design and standard unification, adopting a cost-priority development philosophy, promoting organized breakthroughs in key technologies, and improving ecosystem support mechanisms, to provide robust support for reducing costs and enhancing quality in commercial spaceflight.

Keywords commercial aerospace, low-cost technology, business model, innovation ecosystem, innovation paradox

张 超 上海交通大学安泰经济与管理学院助理研究员。主要研究领域:创新生态系统、创新发展政策、创新投融资等。
E-mail: 18061291419@163.com

ZHANG Chao Assistant Professor at Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University. His research interests focus on innovation ecosystem, innovation development policy, the investment and financing of innovation, etc.
E-mail: 18061291419@163.com

赵 军 上海交通大学安泰经济与管理学院教授。主要研究领域:创新政策、技术转移、科技创业等。
E-mail: zhao-jun@sjtu.edu.cn

ZHAO Jun Professor at Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University. His research interests focus on innovation policy, technology transfer, technology entrepreneurship, etc. E-mail: zhao-jun@sjtu.edu.cn

■责任编辑: 文彦杰