



NASA 在美国商业航天发展中的关键作用

李成智¹, 孙烈^{2*}

1. 北京航空航天大学 人文与社会科学高等研究院, 北京 100191;

2. 中国科学院自然科学史研究所, 北京 100190

摘要: 美国国家航空航天局 (NASA) 的项目管理创新, 是理解美国商业航天跨越式发展的重要切入点。系统回溯 NASA 在商业航天发展进程中的项目管理创新实践, 以商业轨道运输服务 (COTS) 项目为核心案例, 重点剖析其职能定位转变、里程碑式付款机制的设计逻辑与实施成效, 并通过对国内外商业航天政策的比较, 凝练 NASA 管理创新的学术价值与实践启示。研究表明, NASA 的运营模式已从早期政府主导的综合性架构, 逐步转向以政策调整、管理重构与项目创新为支撑的公私合作模式; COTS 项目所采用的基于绩效的固定价格里程碑付款机制, 将主要技术与财务风险转移给企业, 在显著降低航天活动成本的同时有效激发了企业创新能力。NASA 的创新实践不仅为全球商业航天发展提供了重要经验参考, 也为中国商业航天生态体系建设提供了涵盖资产属性界定、产业支撑、协同创新与结构性改革等多维度的借鉴。

关键词: NASA; 商业航天; COTS 项目; 公私合作; 里程碑付款; 航天制度创新; 航天产业政策

中图分类号: V19; F272.3

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)05-0609-10

引言

商业航天作为新兴产业, 已成为中、美、俄、欧、日、印等全球主要国家和地区的战略竞争焦点。其中, 美国商业航天的发展尤其值得关注。自 1958 年美国成功发射首颗人造卫星并成立国家航空航天局 (NASA) 以来, 其商业航天活动便已起步。此后,

历届美国政府持续推动航天技术与活动的商业化: 1962 年, 颁布《通信卫星法案》(Communications Satellite Act of 1962, 简称 CSA, 俗称 Comsat Act); 20 世纪 70 年代后期, 卡特政府推动遥感卫星商业化转型; 1984 年, 国会通过《商业航天发射法案》(Commercial Space Launch Act of 1984, CSLA, 又译作《商业空间发射法》); 1988 年, 里根总统签署命

收稿日期: 2026-01-14; **修回日期:** 2026-01-28

基金项目: 中国科学院战略研究与决策支持系统自然科学史专门项目 (2Q2025000033)

作者简介: 李成智 (1961—), 男, 博士, 教授, 研究方向为航空航天史与发展战略。E-mail: lichengzhi@263.net

*孙烈 (1972—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为现当代高技术史。E-mail: sunlie@ihns.ac.cn (通讯作者)

引用格式: 李成智, 孙烈. NASA 在美国商业航天发展中的关键作用[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(5): 609-618. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260008. CSTR: 32282.14.JES.20260008

LI C Z, SUN L. NASA's Key Role in U.S. Commercial Spaceflight Development[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(5): 609-618. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260008. CSTR: 32282.14.JES.20260008

令, 开放全球定位系统 (GPS) 卫星供民用与商业开发。到21世纪初, NASA启动“商业轨道运输服务”(commercial orbital transportation services, COTS)项目, 为SpaceX等新兴航天企业提供了关键发展契机, 进而推动美国商业航天实现飞跃式增长。

美国作为商业航天领域的领先国家, 其发展离不开NASA在项目管理方面的创新。已有研究普遍认为, NASA自1958年成立初期主导一切航天活动, 至21世纪通过COTS等项目与私营企业合作, 实现了成本降低与技术突破^[1, 2]。这一转变具有重要的研究价值。NASA通过管理创新, 不仅仍是太空探索的参与者, 更成为高效的市场催化剂、智慧的风险投资者以及包容的平台构建者。正是这些管理层面的顶层设计与持续优化, 为美国商业航天产业的指数级增长提供了制度保障与创新土壤, 也为世界各国发展商业航天提供了宝贵范例。

当前, 中国商业航天领域正迎来多重发展契机^[3]。然而, 中国商业航天仍面临一些核心挑战, 如关键技术瓶颈尚未突破、应用场景开发不足、资本供给结构失衡以及制度适配效能滞后等^[4]。本文以NASA在商业航天领域的发展实践为研究对象, 系统梳理其项目管理体系的历史演进过程。研究重点剖析NASA角色定位的转型过程、COTS项目采用的里程碑式付款机制以及相关创新实践的实施效果; 同时, 结合国内外商业航天政策体系的比较分析, 系统提炼NASA项目管理创新对推动美国商业航天发展的学术价值与实践启示。

1 NASA项目管理模式的演变

美国宇航局对商业航天的推进可分为六个阶段。第一阶段是1958—1961年格伦南 (Thomas Keith Glennan) 任期, 主要举措是计划将航天业务外包给工业界, 把通信卫星及卫星通信业务推向市场。由于他任期较短, 这些工作未能有效开展, 但推动了1962年《通信卫星法》的颁布。第二阶段是1962—1972年, 这一时期登月任务是NASA的工作重点, 对商业航天推动作用甚微。第三阶段是1973—1981年, 这一时期NASA在致力于航天飞机研制的同时,

组织开展了太空商业化系统研究, 掀起了太空产业化热潮。同时, 在政府推动下, NASA计划将运载火箭向非政府用户开放。因NASA初步转型, 这一时期出现了几家航天初创公司。第四阶段是1982—1988年, NASA尝试用航天飞机提供商业发射服务, 还成立了商业项目办公室, 逐步剥离非NASA核心任务的项目。在此期间, 政府于1984年通过《商业航天发射法案》, 以法律形式确认并扩大了商业航天发射活动范围。第五阶段是1989—1999年, NASA启动以降低航天活动成本为目标的“更快、更好、更省”(faster, better, cheaper, FBC) 深空探测项目, 同时压缩国际空间站规模, 采取国际合作模式。此外, 航天飞机运行管理部分环节交由企业负责, 大幅降低了人力和管理成本。此时, NASA初步完成身份转变: 从型号产品研制的投资者 (甚至设计者)、拥有者转变为单纯用户。这一时期, 美国政府和国会出台了不少支持商业航天发射的政策或法律。第六阶段是2000年至今, NASA通过创新项目管理模式, 成为推动商业航天大发展的关键力量, 其中最典型的的就是COTS项目。

在前两个阶段, 新成立的美国国家航空航天局 (NASA) 及其下属研发中心, 集项目管理、工程研发、设计制造与资产所有等多重角色于一身。1961年, 美国宣布启动阿波罗计划, 阿波罗飞船的设计工作随即被提上日程。理论上, 在阿波罗飞船的研制流程中, NASA及其载人航天器中心应作为需求方, 先制定设计规范与性能指标, 再通过招标委托多家承包商进行方案设计, 最后评审并择优确定生产方。然而, 阿波罗计划的实际执行过程显著偏离了这一常规模式。

事实上, 在与康维尔 (Consolidated Vultee Aircraft Corporation)、通用电气 (General Electric, GE) 及马丁 (Glenn L. Martin Company) 等公司签订设计合同之际, NASA内部的工程与发展部已在马克西姆·费格特 (Maxime Allen Faget) 的领导下完成了飞船的初步方案设计, 并在承包商工作期间持续进行自我完善。费格特的助手约翰逊后来说: “据我所知, 我们并没有打算使用这三家公司的方案, 至少我不这样打算。”他进一步解释道: “当然, 我们绝不可

能输掉。我们可以了解所有三家公司的情况,但他们彼此之间却不能互相讨论,也不可能看到我们的。所以他们搞得出色的东西,我们可以窃取;但是我们搞得出色的东西,他们却无法知道。”^{[5]118}

这种主导地位在飞船外形的选择上体现得尤为突出。费格特坚信内部方案最优,在合同签订前就向各公司代表明确表示,应停止对其他外形的无谓争论。早在1960年10月,团队就已确定了阿波罗飞船的最终外形。各承包商提交方案后,费格特虽表示感谢,但直接宣布太空任务组(载人航天器中心的前身)将采用自有设计。费格特事后亦承认此举存在风险,并阐明了其决策逻辑:“我们付给他们钱是为了让我们告诉我们如何去制造这个东西,但是他们每家拿出的设计都不一样,而我们所要的仍然只是我们迄今一直在使用的。所以我们就这么干了。”最终,各承包商均依据NASA提供的方案重新做了调整与修改,从而确立了NASA在技术研发中的绝对主导地位^{[6]37-38}。

在美苏太空竞赛最激烈的阶段,特别是在肯尼迪和约翰逊总统任期内,美国政府、NASA及其高层管理者的核心任务都集中在阿波罗登月计划上,商业航天的发展因此未得到足够重视。同时,作为美国民用航天活动的唯一主管机构,NASA倾向于构建并掌控全链条的航天能力。这一导向体现在其合同模式中:NASA为实施各类计划与承包商签订的合同明确规定,所有硬件成果及其知识产权均归NASA所有。从用于登月的土星系列火箭、阿波罗飞船和登月舱,到后续的航天飞机项目,无一例外。在此模式下,主承包商更像是将NASA,尤其是载人航天器中心的设计方案转化为实体产品的制造商,而非发挥自身创造力的设计主体。这种模式抑制了承包商的创新能动性,且承包商不享有利用这些硬件开展商业活动的权利。这一现象与空军主导研制的大力神(Titan)、宇宙神(Atlas,阿特拉斯)、德尔塔(Delta)系列火箭的情况类似,真正的技术开发商既无法充分释放创新思维,也缺乏技术成果商业化的途径。

进入20世纪80年代,国际竞争格局的演变以及国内预算的收缩,共同推动NASA开启了战略调整与机构精简的进程。1981年成为关键转折点:4月,延

期已久的哥伦比亚号航天飞机(OV-102)成功首飞;仅两个月后,欧洲空间局的阿丽亚娜火箭(Ariane,也译作阿里安火箭)也成功执行了商业发射任务。这标志着NASA在商业载荷发射领域直接面临来自欧洲的竞争压力。与此同时,新上任的里根政府秉持自由市场理念,主张私营部门应主导具有经济可行性的航天活动。随着航天飞机投入使用,政府市场对一次性运载火箭的需求大幅减少。里根政府于是推动制造商将此类火箭转向商业发射服务。由此,NASA不仅面临来自欧洲的外部竞争,还需应对国内一次性运载火箭制造商带来的市场挑战,内外双重压力迫使其重新审视自身定位和未来发展方向。从更长期的财政视角来看,NASA的预算压力持续加剧。尽管其净预算在冷战结束后仍有微弱增长,但年均增长率仅约0.4%,且占联邦总预算的比例持续下滑——从1965年阿波罗计划高峰期的4.7%降至1992年的1%。在此背景下,当时的几届美国政府均倾向于进一步鼓励商业航天发展,推动NASA逐步剥离其传统上承担的非核心业务,以适应新的战略环境。

进入20世纪90年代,克林顿政府推行压缩航天活动开支的政策,在此背景下,NASA的深空探测任务引入了FBC理念。此前,NASA的深空探测计划呈现两极分化态势:20世纪70年代的海盗号(Viking)计划与旅行者号(Voyager)计划成果卓著,但沿袭了阿波罗时代不计成本的开发模式;而80年代的伽利略号(Galileo)、麦哲伦号(Magellan)、火星观察者号(Mars Observer)计划,则普遍陷入成本超支、进度延误的恶性循环。1992年,新任局长戈尔丁(Daniel Saul Goldin)正式提出FBC理念,其核心是通过研制功能专一、重量更轻的小型探测器来降低发射成本。与之配套的措施是向小型化、非正式化的项目管理模式转型,以削减高昂的管理开销。

FBC理念的推行,不仅是应对预算压力的权宜之策,更标志着NASA角色定位发生了根本性转变。这一转变背后,存在三重动因:NASA寻求科研思路创新;适应预算困境;响应美国政府降低航天项目成本的要求,推动低轨道任务商业化。戈尔丁在任期内大力推动改革,逐步将空间站设计、航天飞机运营、卫星数据处理乃至部分任务控制中心等职能移交给承包

商。至此, NASA开始从传统的航天器设计者与所有者, 转变为航天产品与服务的采购方和用户, 为商业航天的发展释放了巨大空间。

进入21世纪, 美国对商业航天的支持策略由“转型”进入“创新”阶段。2005年4月, 格里芬(Michael Griffin)出任NASA局长, 他延续了前任的战略思路, 主张NASA应聚焦太空探索前沿领域, 将近地轨道运输等常规任务交由私营部门承担。为此, 他主导推出COTS项目, 旨在利用NASA的采购权作为市场激励手段。2005年11月, NASA在约翰逊航天中心成立商业乘员与货物项目办公室(Commercial Crew & Cargo Program Office, C3PO), 具体负责COTS项目的实施。2006年1月, NASA正式启动该项目, 旨在通过有限的资金支持和技术服务支持, 委托中标公司开发向国际空间站运送货物的货运飞船。2011年, NASA又启动商业乘员开发计划(development of the commercial crew program, CCDev), 依照COTS模式招标研制用于国际空间站乘员轮换的载人飞船。

至此, NASA支持商业航天发展的政策框架已全面成型。这一转变带来了双重效应: 一方面, 它极大地推动了商业航天产业的繁荣, 扶持了一批新兴私营企业; 另一方面, 也促使NASA自身定位彻底转型——从航天领域的全能执行者, 转变为以空间科学探索为核心、其他能力从市场采购的政府科研与管理机构。在合作模式上, NASA与承包商的关系也从传统的“成本加成”(cost-plus)合同转变为“伙伴关系”。新模式赋予承包商更大的自主权和商业灵活性, 允许其在满足NASA任务要求的同时, 将产品推向更广阔的商业市场以获取更多收益, 从而有效激发了其创新活力。NASA项目管理模式的这一转变, 体现了从“控制”到“协作”的管理哲学变化, 与强调系统性、互动性的创新系统理论高度契合。

2 推动商业航天大发展的COTS等项目

2005年12月30日, 布什总统签署的《美国国家航空航天局授权法案》(*NASA Authorization Act*, 也常译作《NASA再授权法案》*NASA Reauthorization*

Act)为COTS项目的建立提供了坚实的法律基础。该法案明确要求NASA“与私营部门密切合作”, 鼓励其开发能够发射卫星、宇航员或货物的新产品, 并应尽可能提供乘员和货物发射服务, 包括服务于国际空间站^[1]。至此, COTS项目从政策构想正式进入操作实施阶段。

初定周期为五年的COTS项目(2006—2010年), 其核心创新体现在全新的合作范式与采购机制上, 主要包括以下四个方面: 第一, 把低轨道运输任务完全外包给私营企业; 第二, 减少政府在空间站服务方面的投资; 第三, 购买发射服务, 而非拥有运载器(“buy a ticket, not a vehicle”); 第四, 采用基于性能的里程碑价格模式(performance-based, fixed-price milestones), 即NASA为中标企业提供阶段性经费支持, 彻底摒弃了传统的成本加成合同模式^{[7]11-12}。

在资金使用方式上, COTS与以往模式存在根本区别。传统的成本加成合同确保了承包商的研制成本与利润, 形成了“旱涝保收”的局面, 这削弱了企业控制成本与追求创新的动力。而COTS的固定价格模式则将成本超支的风险完全转移给承包商^[8]。为了在有限的固定预算内完成任务并实现未来的商业盈利, 私营企业被迫在产品和服务上进行深度创新。

其中, “里程碑”价格模式是COTS项目最具特色的制度设计。中标企业要在合同期内自主设定一系列清晰的里程碑, 明确各阶段的目标、任务和时间节点。NASA仅依据里程碑的完成情况, 进行阶段性付款并批准后续阶段启动。这一机制把资金支付和实际绩效直接挂钩, 让企业承担主要的技术与财务风险。为达成里程碑、获取后续资金、建立市场信誉, 企业必须在技术、管理及财务等层面开展系统性改革与创新。正如NASA局长格里芬所说, 该模式类似于建造住宅的分期付款: “直到他提供了所有的产品(即完整的住宅), 他才能得到所有的钱。”^{[7]13}这一比喻精准概括了其风险共担、绩效导向的本质。表1梳理了NASA所采用的新型公私合营模式与传统公私合营模式的各项对比情况^[9]。

2006年1月18日, NASA正式发布COTS项目提案公告, 截至3月3日共收到20家公司提交的21份建议书。同年8月18日, NASA与美国太空探索技术公

表1 NASA 传统公私合营模式与新型公私合营模式对比
Table 1 A comparison between NASA's traditional public-private partnership model and the new public-private partnership model

项目	传统公私合作	新型公私合作
管理模式	自上而下：NASA 负责目标制定、总体设计和项目管理	自下而上：NASA 提出需求，企业制定方案、实施项目管理和技术开发
技术方案	NASA 根据多种方案自主选择	企业自行选择
资金投入	NASA 负责项目全部经费	NASA 投入 50% 以下资金，其余由企业自筹
技术可控性	NASA 可以准确把握项目进度并及时调整方案	NASA 对项目无法有效把控
项目风险	NASA 承担主要风险	企业承担主要风险
创新特点	传统模式，NASA 承担经费与风险，主承包商创新动力不足	新型模式，企业为完成里程碑必须不断进行各种创新
市场探索	承包商从政府项目中获得的利润相当可观，对开发商业市场兴趣不高	企业前期投资很大，希望通过商业市场开发，收回投资并获得利润，积极性很高

注：根据毕勋磊等^[9]的研究整理。

司（SpaceX）及火箭飞机-基斯勒公司（Rocketplane Kistler Limited Inc. RpK）签署了第一阶段太空行动协议^{[10]①}。根据协议，SpaceX 与 RpK 分别获得 2.78 亿 USD 和 2.07 亿 USD 的资金，该额度依据其申请额及各自的里程碑设置而定。SpaceX 规划了 19 个里程碑，而 RpK 设置了 15 个。然而，COTS 项目办公室在 2007 年经过评估发现，RpK 公司在财务融资与技术进度上未能满足里程碑要求，NASA 依据规则中止了合作，并向其支付了 3210 万 USD 作为补偿。随后，NASA 启动第二轮遴选，于 2008 年 2 月 19 日选择轨道科学公司（Orbital Sciences Corporation）作为替代方，授予其剩余的 1.7 亿 USD 合同。轨道科学公司凭借其自有资金及在金牛座 II 型火箭（Taurus II，后改名安塔瑞斯 Antares）上已验证的市场表现，被视为更稳妥的选择^{[7]32-33, [11]}。除了资金支持，NASA 还提供了技术咨询与指导^[12]。

COTS 项目对 SpaceX 等新兴企业起到了显著的催化作用。以 SpaceX 为例，其员工规模从项目启动初期的不足百人，扩张至项目完成时的 3000 余人。2010 年 12 月 8 日，SpaceX 成功完成猎鹰 9 号火箭与

龙飞船^②的首次演示飞行，此次成功不仅极大地增强了 NASA 对 COTS 模式的信心，也为 SpaceX 赢得了行业声誉，为其后续赢得“商业补给服务”（commercial resupply services, CRS）合同奠定了坚实基础。

不过，鉴于该项目系首度开展面向国际空间站的纯商业货运任务，且涉及企业众多，加之此前有中标企业因未达成既定里程碑而退出，需重新评估并增补新的合作方，同时现有中标企业亦面临技术与资金方面的挑战，NASA 原定的 COTS 项目周期被迫延后。2012 年 5 月 22 日，SpaceX 的龙飞船发射升空，并于 5 月 25 日成功与国际空间站对接，成为历史上首个完成空间站补给任务的私营企业^[13]。2013 年 10 月 22 日，轨道科学公司天鹅座货运飞船重入新西兰以东太平洋的大气层，标志着 COTS 项目完成^[14]。

COTS 项目大幅降低了国际空间站传统补给模式的运营成本。以航天飞机为例，1995—2002 年间，其单次发射费用约为 8.06 亿 USD；若将项目全部预算纳入计算，单次发射成本更高达 16.42 亿 USD。相比之下，NASA 与 SpaceX 签署的 8 次载人龙飞船发射

① NASA 与两家公司签署的是 COTS 项目的“演示”协议，在这一阶段，中标公司需要通过技术开发活动，最终发射 2~3 艘试验性货运飞船，以此证明公司已经具有了向国际空间站发射货运飞船的能力。此后经过评估，NASA 还将与中标公司签订第二阶段协议，即商业再补给服务（commercial resupply services, CRS）协议，NASA 将按货运飞船向国际空间站补给的发射次数向中标公司付款，即购买服务。只有在这一阶段，中标公司才有可能真正实现盈利。

② 猎鹰 9 号（Falcon 9）SpaceX 研制的两级液氧煤油中型运载火箭；龙飞船是配套的可重复使用轨道飞船，分为货运龙、载人龙两个版本，二者组成商业航天标志性箭船组合。

合同总额为 26 亿 USD, 平均单次成本仅为 3 亿多 USD。这充分表明, 通过商业模式进行国际空间站补给, 成本得到了大幅压缩。更为重要的是, NASA 推动了 SpaceX 将猎鹰 9 号成功推向市场。截至 2025 年 7 月, 该火箭已累计执行 600 次发射任务, 其中绝大多数为商业发射; 载人龙飞船也完成了 5 次商业发射^[15]。凭借高密度的发射频次、极高的可靠性以及低廉的价格, SpaceX 赢得了极高的市场声誉, 其估值预计可超过 1 万亿 USD^[16]。

COTS 项目还有力助推了 SpaceX 等公司的发展壮大, 因而赢得了 NASA 及各商业航天公司的高度评价。时任 SpaceX 总裁兼首席运营官肖特威尔 (Gwynne Shotwell) 评价 COTS 项目是全体美国人的胜利; 轨道科学公司认为 “COTS 计划的独特结构在于, NASA 的技术专长、经验丰富的载人航天团队以及成熟的安全运营标准为其提供了整体框架, 使轨道科学公司得以将商业领域的活力、创新和规范融入项目, 最终打造出可靠且具有成本效益的补给服务”。时任 NASA 局长博尔登 (Charles Bolden) 更评价道, COTS 项目标志着 “商业航天产业将成为 21 世纪美国经济增长的引擎, 并将助力我们开展更加雄心勃勃的深空探索任务”^[17]。

NASA 同期还筹备常态化的 CRS 项目。2008 年 12 月 23 日, NASA 正式与 SpaceX 及轨道科学公司签订 CRS 合同, 合同金额分别高达 16 亿 USD 和 17 亿 USD。根据合同, SpaceX 承诺在 2016 年前为国际空间站执行 12 次补给任务, 总货运量超过 20 t^[18]。2012 年 10 月 8 日, SpaceX 正式启动 CRS-1 任务。此后, SpaceX 又获得了第二阶段 CRS 补给合同。截至 2020 年 12 月, SpaceX 已为国际空间站执行了 21 次货运与载人补给任务, 除首次演示飞行停留 10 d 外, 其余任务滞留时间均约 30 d, 累计运送货物总量超过 49.7 t^[19]。其第二代货运龙飞船于 2020 年 12 月 6 日首飞, 并展现出高度的可复用性, 截至 2025 年 8 月 24 日, 已执行 13 次飞行任务, 其中编号 C208 与 C209 的货运龙飞船各已复飞 5 次。

继 COTS、CRS 项目之后, NASA 又推出了前往国际空间站的商业乘员项目 (commercial crew program, 2011 年)、阿尔忒弥斯重返月球计划

(Artemis program) 的乘员着陆系统 (Human landing system, 2019 年) 项目, SpaceX 公司、波音公司和蓝色起源公司 (Blue Origin) 赢得相应合同。以开发商业载人亚轨道太空旅游飞船而闻名的蓝色起源公司由此获得很大发展, 在 2025 年 11 月 13 日实现了新格伦重型火箭第一级成功回收。

尽管其他主要航天国家在商业航天领域积极开展探索, 但其模式往往缺乏像 NASA 那样的系统性制度创新。以欧洲为例, 1980 年成立的阿丽亚娜航天公司, 依靠欧空局研制的阿丽亚娜火箭, 凭借价格优势迅速占据全球商业发射市场的半壁江山。然而, 该模式本质上仍延续传统研制路线, 使得发射成本居高不下、发射准备周期过长, 从长远来看不利于维持其核心竞争力^[20]。

3 COTS 等项目推动 SpaceX 公司持续创新

美国商业航天取得的卓越成就, 是 NASA 通过系统性制度创新 (如 COTS 项目) 与商业航天企业内生创新要素协同作用达成的。除了依照里程碑模式为中标企业提供经费支持外, NASA 还在技术、硬件、地面设施、航天发射场使用以及产品商业化等方面, 为这些企业提供全方位支持。例如, NASA 艾姆斯研究中心 (Ames Research Center, ARC) 2006 年成功将其自主研发的酚醛浸渍碳烧蚀材料 (PICA) 应用于 “星尘号” 采样返回舱的前缘热盾, 助力该航天器在峰值热流 1000 W/cm²、总吸热量 28 kJ/cm² 的极端环境下安全重返大气层。基于这项经飞行验证的技术, SpaceX 研制出 PICA-X 变体, 并将其应用于 2010 年 COTS 演示飞行 1 任务中 “龙飞船” 一号的热防护系统, 保障飞船在约 50 W/cm² 的较低热流条件下, 顺利完成地球轨道飞行及太平洋海域回收^[21]。

由于 NASA 系统性的制度化创新, 也带动了中标企业敢于冒险、勇于创新^[22]。以 SpaceX 为代表的成功企业, 其内在创新逻辑可以归结为以下几个核心原则:

(1) 颠覆性创新精神与工程实践导向。SpaceX 创始人、首席执行官马斯克展现出对既有技术范式的根本性质疑。在半个多世纪的运载火箭发展史中, 一

次性使用被视为定论, 部分可重复的航天飞机成本高昂, 而完全可重复的空天飞机则因技术壁垒而搁浅。面对这些行业“共识”, 马斯克从创立之初便确立了可重复使用的终极目标, 并通过猎鹰9号实现了关键突破, 不仅显著降低了发射成本, 更引领了行业发展的新方向。

(2) 第一性原理思维方法。马斯克把第一性原理当作解构航天成本问题的核心工具, 坚信火箭造价高昂并非必然。这一方法论体现在: 从最基础的发动机和火箭结构着手, 掌握核心研制规律; 从项目起始便布局可重复使用技术; 通过垂直整合, 实现核心部件自主制造或从民用市场采购, 以此确保技术自主性与成本可控性; 同时积极引入3D打印、先进焊接、新型耐热材料以及现代设计软件等前沿技术, 推动全方位技术创新。

(3) 设计简约性原则。SpaceX在产品设计中贯彻了“简约即意味着可靠”的理念。以猎鹰1号为例, 它采用简单的两级结构、成熟的燃气发生器循环发动机以及标准化材料, 尽管初期表现不尽如人意, 但却为团队积累了宝贵的研制经验。在此基础上发展出的猎鹰9号, 延续了简约设计风格: 两级采用直径、材料与制造工艺相同的贮箱, 二级是一级的短版, 这极大地降低了生产成本。同时, 它创新性地采用9台发动机并联的冗余设计, 解决了故障重构难题, 进一步提升了可靠性。

(4) 快速迭代创新模式。SpaceX把猎鹰1号定位为“最小可行产品”, 将其作为迭代创新的原型平台。其灰背隼发动机历经从1A到1D的四次迭代。猎鹰9号作为第二代产品, 通过增加发动机数量、优化性能, 实现了运载能力跃升以及可重复使用。重型猎鹰可看作第三代产品, 它通过模块化捆绑(3枚猎鹰9号一级)的方式, 将近地轨道运载能力提升至63.8 t。这种“原型-产品-优化”的快速迭代路径, 是推动其技术持续进步的核心动力。

综上所述, 尽管这些创新原则并非SpaceX首创, 但其通过系统整合、极致化应用及坚定不移地执行所形成的独特战略, 构成了其成功的核心要素。相较于主要竞争对手蓝色起源公司——后者虽同样具备创新愿景, 但采取更为渐进式的发展路径并强调技术保密——

SpaceX凭借开放策略与激进迭代模式, 在商业转化与技术成熟度方面建立了显著优势, 从而在商业航天领域实现差异化竞争格局。

4 结论

全球商业航天正成为大国太空战略竞争的核心赛道, 政府与市场如何协同赋能航天产业, 是各国亟须破解的现实命题。美国依托NASA的制度创新实现了商业航天的跨越式增长, 其公私合作实践具有重要的样本研究价值。本文在梳理NASA项目管理模式历史演进脉络的基础上, 以COTS项目为核心案例剖析里程碑式付款机制的制度逻辑, 并结合SpaceX的企业创新实践解析制度创新与内生创新的协同关系, 通过国内外商业航天政策对比提炼可借鉴的改革启示。

研究表明, NASA的角色经历了从航天工程全链条执行者向市场催化剂、服务采购方的深刻转型。冷战期间, 作为民用航天活动的核心主导机构, NASA主要采用“成本加成”合同模式委托开发航天系统并持有资产所有权。该模式虽保障了项目执行, 却导致航天活动成本持续高企。冷战结束后, 在政府降本增效的政策导向下, NASA启动战略转型, 其标志性举措是实施COTS项目, 引入基于绩效的固定价格里程碑付款机制。该机制构建了与承包商的新型伙伴关系, 有效激发了商业航天企业的创新活力。通过项目管理模式的根本性革新, NASA成功驱动了商业航天领域的跨越式发展。此转型历程为中国等发展商业航天的其他国家, 提供了重要参考: 顶层政策设计与管理范式创新, 是激活产业潜力与可持续发展的关键路径。

对标美国发展经验, 结合我国商业航天发展的现实困境, 可从四个方面推进产业体系建设, 着力构建完善的商业航天生态体系。(1) 推动航天资产属性界定的改革, 淡化运载火箭与航天器的军工产品定位, 适度放宽民用航天活动实施的监管, 释放既有体系的潜力。(2) 聚焦未来科技与产业制高点, 鼓励国有企业与民营企业的深度合作, 推动科技创新与产业创新深度融合。(3) 构建涵盖新兴产业与未来产业的完整体系, 系统性开放航天发射、测试、测控等基础设施。

施,并向民营航天企业提供关键技术、核心部件及产品的重点支持,以健全商业航天新质生产力的供应链。(4)深化传统航天巨头的结构性转型,精简剥离非核心业务,向市场开放技术含量相对较低、保密性

要求不强但商业价值较高的业务、项目、设施及人力资源,为商业航天发展注入创新活力,构建具有中国特色与国际竞争力的航天产业新格局。

参考文献

- [1] Lambright W H. Launching commercial space: NASA, cargo, and policy innovation[J]. Space Policy, 2015, 34: 23-31.
- [2] Entrena Utrilla C M. Asteroid-COTS: Developing the cislunar economy with private-public partnerships[J]. Space Policy, 2017, 39: 14-19.
- [3] 祝凤岚. 多重利好出现,商业航天迎来发展新机遇[N]. 中华工商时报, 2025-12-03.
Zhu F L. Multiple positive factors emerge, bringing new development opportunities for commercial aerospace[N]. China Business Times, 2025-12-03.
- [4] 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 /Z)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.
- [5] 查尔斯·默里, 凯瑟琳·B. 考克斯. 阿波罗——登月之旅[M]. 黄仲琪, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1992.
Murray C, Cox C B. Apollo: The Race to the Moon[M]. New York: Simon & Schuster, 1989.
- [6] Brooks C G, Grimwood J M, Swenson L S. Chariots for Apollo: A History of Manned Lunar Spacecraft[M]. Washington: NASA, 1979.
- [7] Rebecca H. Commercial Orbital Transportation Services: A New Era In Spaceflight[M/OL]. [2025-11-15]. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/sp-2014-617.pdf>.
- [8] 黄志澄. 商业航天是美国太空探索的新动力[J]. 国际太空, 2016(5): 64-68.
Huang Z C. Commercial space is new drive for U.S. space exploration[J]. Space International, 2016(5): 64-68.
- [9] 毕勋磊, 刘剑, 张志强. 公私合营研发组织模式研究: 基于NASA-SpaceX合作研发案例研究[J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(1): 95-103.
Bi X L, Liu J, Zhang Z Q. Research on public-private technology R & D partnerships: Lessons learnt from the case of partnerships between NASA and SpaceX[J]. World Sci-Tech R & D, 2018, 40(1): 95-103.
- [10] NASA. Space act agreement for COTS[EB/OL]. (2024-04-06) [2025-11-05]. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/04/189228main_setc_nnj06ta26a.pdf.
- [11] Douglas C. Statement of Douglas Cooke before the Committee on Science, Space and Technology Subcommittee on Space and Aeronautics U. S. House of Representatives[EB/OL]. (2011-03-30) [2025-11-17]. https://science.house.gov/_cache/files/f/8/f8476a1c-a22f-47db-bcb1-04bc045b06a7/D326827DFF9EF01BE7B19633E0B3ADAD.cooke-testimony-3-30-11.pdf.
- [12] Jason R. SpaceX's musk talks preparing to recover Falcon 9 first stage, crewed efforts, and more-AmericaSpace[EB/OL]. (2013-04-01) [2026-01-11]. <https://www.americaspace.com/2013/04/01/musk-spacex-preparing-to-recover-falcon-9-first-stage-crewed-efforts-more/>.
- [13] Anderson C. Rethinking public-private space travel[J]. Space Policy, 2013, 29(4): 266-271.
- [14] Keith C. Orbital completes COTS demonstration mission to international space station[EB/OL]. (2013-10-23)[2026-01-24]. <https://spaceref.com/space-commerce/orbital-completes-cots-demonstration-mission-to-international-space-station/>.
- [15] Robinson-Smith W. SpaceX Launches its 500th Falcon 9 rocket-spaceflight now[EB/OL]. (2025-07-01)[2026-01-18]. <https://spaceflightnow.com/2025/07/01/live-coverage-spacex-to-launch-27-starlink-satellites-on-a-falcon-9-rocket-from-cape-canaveral/>.
- [16] Wang E, Saini M, Babu J. Elon Musk's SpaceX to raise over \$25 billion in blockbuster 2026 IPO, source says[EB/OL]. (2025-12-09)[2026-01-24]. <https://money.usnews.com/investing/news/articles/2025-12-09/spacex-to-pursue-2026-ipo-raising-above-30-billion-bloomberg-news-reports>.
- [17] NASA. NASA hails success of commercial space program private space station resupply underway, plans readied for Astronauts-NASA[EB/OL]. (2013-11-13) [2026-01-24]. <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-hails-success-of-commercial-space-program-private-space-station-resupply-underway-plans-readied-for-astronauts/>.
- [18] Louis D G M. The commercial resupply services contracts[EB/OL]. (2019-06-03) [2022-05-24]. <https://www.spacelegalissues.com/the->

commercial-resupply-services-contracts/.

- [19] 张力, 王妍. 美国以商业航天推进国际空间站的做法及启示[J]. 国际太空, 2021(1): 59-62.

Zhang L, Wang Y. The practice and enlightenment of the United States to promote the international space station by commercial space flight[J]. Space International, 2021(1): 59-62.

- [20] 张东生, 钱尧, 卢怡, 等. 标准制度型开放提升我国产业国际竞争力路径研究[J]. 标准科学, 2025(8): 33-39.

Zhang D S, Qian Y, Lu Y, et al. Enhancing China's industrial international competitiveness through standard institutional opening up[J]. Standard Science, 2025(8): 33-39.

- [21] Stackpoole M, Kao D, Qu V, Gonzales G. Post-flight evaluation of PICA and PICA-X - comparisons of the stardust SRC and Space-X Dragon 1 forebody heatshield materials[EB/OL]. (2023-06-18)[2026-01-24]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140005558>.

- [22] 张斌, 龚敬才, 曾小军. 标准化与科技创新互动发展现状及作用机制研究[J]. 标准科学, 2025(7): 24-28.

Zhang B, Gong J C, Zeng X J. Research on the current status and mechanism of the interaction between standardization and technological innovation[J]. Standard Science, 2025(7): 24-28.

NASA's Key Role in U.S. Commercial Spaceflight Development

LI Chengzhi¹, SUN Lie^{2*}

1. Higher Institute of Humanities and Social Sciences, Beihang University, Beijing, 100191, China;

2. Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

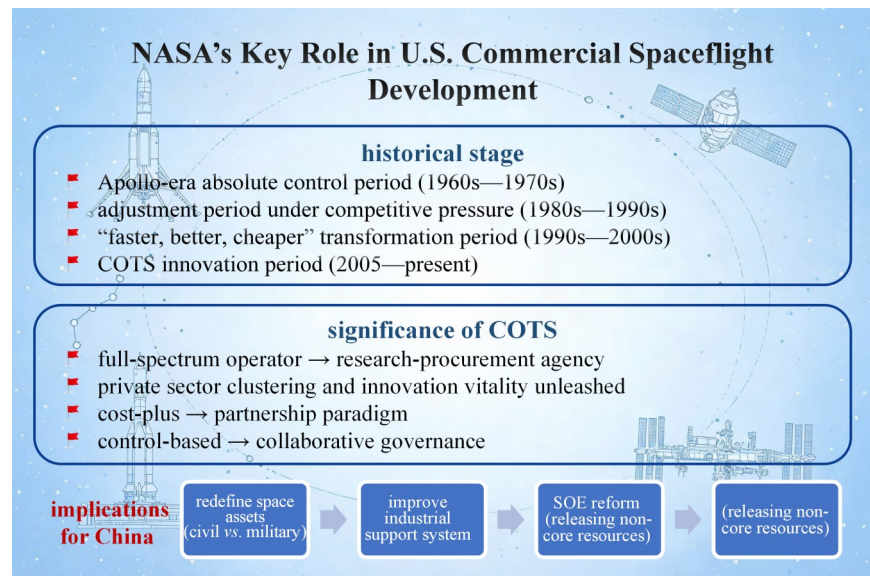
Highlights

NASA's milestone-based payment mechanism in the COTS program represents a breakthrough in institutional innovation within public-private partnership models for high-tech sectors, compelling deep technological innovation by transferring cost-overrun risks to enterprises.

The shift in management philosophy from 'control' to 'collaboration' was pivotal to NASA's successful transformation into a market catalyst, reconfiguring the incentive compatibility for innovation between the government and contractors through the delegation of technical autonomy.

The advancement of China's commercial space sector requires drawing upon NASA's experience to redefine space asset attributes, establish industrial support systems, and facilitate the release of non-core resources from state-owned aerospace conglomerates to the market.

Graphical Abstract



Abstract: This study traces the evolutionary trajectory of NASA's project management innovations in commercial space development, with particular focus on the landmark payment mechanism of its signature policy instrument—the Commercial Orbital Transportation Services (COTS) program. It aims to elucidate how NASA's managerial innovations effectively catalyzed the commercial space ecosystem and to distill actionable reform pathways for China's burgeoning commercial space sector.

The analysis first delineates four pivotal phases in NASA's management paradigm evolution: the Apollo-era absolute control period (1960s–1970s), the adjustment period under competitive pressure (1980s–1990s), the "Faster, Better, Cheaper" (FBC) transformation period (1990s–2000s), and the COTS innovation period (2005–present). Second, using COTS as a central case study, it deconstructs the design principles of its performance-based, fixed-price milestone mechanism, including the specific protocols linking fund disbursement to milestone attainment. Third, it examines how SpaceX's risk-taking and innovative culture was systemically shaped by NASA's institutional innovations, analyzing the underlying innovation logic.

Since 2005, the implementation and sustained operation of COTS have marked the maturation of NASA's policy framework for commercial space development. This has profoundly stimulated industry prosperity and nurtured a cohort of emerging private enterprises, while transforming NASA from an all-encompassing space implementer into a government research and management agency focused on space science exploration that procures other capabilities from the market. The shift from traditional cost-plus contracts to partnership-based arrangements granted contractors greater autonomy and commercial flexibility, enabling them to commercialize products in broader markets while fulfilling NASA mission requirements, thereby effectively energizing innovation. This evolution embodies a philosophical shift from "control" to "collaboration", aligning closely with innovation systems theory that emphasizes systemic interactivity.

NASA's institutional innovation offers multifaceted insights for the development of China's commercial space ecosystem. First, space asset attributes should be redefined by de-emphasizing the military positioning of launch vehicles and spacecraft, with moderately relaxed regulation for purely civil space activities. Second, a comprehensive industrial support system should be established, providing private space enterprises with critical technologies, core components, and product support to strengthen supply chains. Third, cross-institutional collaborative innovation should be promoted, encouraging deep cooperation between state-owned and private enterprises in developing core commercial space products. Finally, China's traditional aerospace giants should undergo structural transformation—following NASA's evolution—to streamline non-core operations and transfer to the market those businesses, projects, facilities, and personnel with relatively lower technical complexity, minimal confidentiality requirements, but high commercial value, thereby infusing vitality into commercial space enterprises and forging a more dynamic and competitive aerospace industry landscape.

Keywords: NASA; commercial space; COTS program; public-private cooperation; milestone-based payment; space institutional innovation; space industrial policy

Received: 14 Jan. 2026; **Accepted:** 28 Jan. 2026; **Published online:** 14 Sep. 2026