

中国嫦娥探月工程的实践历程与创新初探

王晶金¹, 李成智^{1,2*}

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. 北京航空航天大学 杭州国际创新研究院, 杭州 310000

摘要: 嫦娥探月工程在中国建设航天强国征程中是重要里程碑, 是中国航天的第三个里程碑, 是国家综合实力的体现。本文通过梳理嫦娥探月工程的实践历程, 分析了嫦娥探月工程决策的背景、各阶段建设过程中体现的特点, 重点探讨了嫦娥探月工程“三步走”战略的形成背景及各阶段创新之处, 对嫦娥探月工程中涉及的工程、技术与管理创新进行了初步探讨。嫦娥探月工程开创的三级组织体系、多主体决策、第三方前置风险评估、科技创新与科学普及协同发展等立足于科技自立自强, 为未来重大工程实施提供了参考借鉴。

关键词: 嫦娥探月工程; 工程创新; 航天史

中图分类号: V11;N91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2024)03-0364-11

引言

我国正在建设航天强国。根据《2021 中国的航天》^[1], 航天强国的标志是拥有世界一流的科学认知太空、自由进出太空、高效利用太空、有效治理太空的能力。月球探测是我国建设航天强国的必由之路, 是更好地认识和保护地球的重要途径, 是开发利用月球资源的必然要求, 更是人类共同的事业, 具有政治、经济、科技、军事等战略意义。探月工程与载人

航天在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》^[2]中被共同列入“国家十六个重大科技专项”^[3]。探月工程嫦娥五号任务取得圆满成功, 习近平主席会见相关参研参试人员代表, 肯定了嫦娥五号在探月工程中的标志性地位和对中国航天的重要意义, 指出“是发挥新型举国体制优势攻坚克难取得的又一重大成就, 是航天强国建设征程中的重要里程碑”^[4]。

嫦娥探月工程分“绕、落、回”三步走发展, 从

收稿日期: 2023-11-11; **修回日期:** 2024-05-16

基金项目: 国家社会科学基金项目“新中国 70 年航天事业独立创新模式及现代意义研究”(19BDJ064); 中国科学院自然科学史研究所“十四五”重大项目“中外科技创新史比较研究——科技自立自强之路”

作者简介: 王晶金(1987—), 女, 博士, 助理教授, 研究方向为航天史、科学史理论等。

*李成智(1961—), 男, 博士, 教授, 研究方向为航空航天发展史与发展战略等。E-mail: lichengzhi@263.net (通讯作者)

引用格式: 王晶金, 李成智. 中国嫦娥探月工程的实践历程与创新初探[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16(3): 364-374. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23011111

Wang J J, Li C Z. Practical History and Innovation of China's Chang'e Lunar Project[J]. Journal of Engineering Studies, 2024, 16(3): 364-374. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23011111

2004年立项到2020年圆满收官, 历时达17年。“三步走”发展战略是由于探月活动的内在规律、国际国内形势的发展变化等各种复杂因素共同促成的。探月工程相关研究文献较多, 比如叶培建等^[5]介绍了我国月球探测活动的实施策略、任务需求与特点、设计思路与要点和技术实现途径, 工程实践与管理经验; 吴伟仁等^[6]总结了探月工程的进展、成就与经验启示; 于登云等^[7]简述了探月工程和科学目标, 介绍了实施效果, 总结了主要技术成就; 欧阳自远^[8]、栾恩杰^[9]从不同时期不同阶段梳理了探月工程。现有研究多侧重于从技术、设计、工程维度探讨嫦娥探月工程, 为本文了解嫦娥工程技术发展提供了基础, 但鲜有研究立足于技术史、工程史与创新史的视角系统探讨探月工程的历史与创新。

嫦娥探月工程是重大战略决策, 嫦娥探月工程第三期嫦娥五号任务更是我国复杂度最高、技术跨度最大的航天工程系统, 为什么要制定“三步走”发展战略? 哪些因素影响嫦娥探月工程战略制定与实践? “三步走”发展阶段是如何不断创新实践的? 嫦娥探月工程建设过程中取得了哪些创新成就? 这些问题都有待探讨, 因此本文将根据战略思想的不同, 以探月工程发展的各历史阶段为主线, 对其进行较为深入的探讨, 旨在为强化我国战略科技力量提供一些有益的思路。

1 嫦娥探月“绕、落、回”三步走发展战略的形成

在2000年发布的《中国的航天》白皮书^[10]中, 明确将探月工程确定为深空探测的首要任务^[9]。探月工程的一期“绕月”项目于2004年获得批准并立项, 而二期和三期工程也在2005年被纳入国家中长期科技发展规划。基于以往航天工程的成功经验, 探月工程一开始就明确了“绕、落、回”三步走的发展战略, 并根据上一任务的执行情况和探月的进展, 再逐步确定具体型号项目的实施。以下是形成“绕、落、回”三步走发展战略的主要因素。

在技术层面, 相关专家和决策者充分考量了国内

技术发展现状, 同时借鉴国际探月成功的案例与技术, 为制定探月战略提供了确凿的科学依据。这一依据主要得益于总指挥栾恩杰、总设计师孙家栋、月球应用科学首席科学家欧阳自远等航天领域专家的深入分析。他们在详尽研究美苏月球探测历程的基础上, 总结出月球探测活动通常遵循从硬着陆到绕月, 再到软着陆, 最终采样返回的逐步深入过程。尽管各国在探月步骤上存在差异, 但大体上是根据技术难度和探测深度来分阶段推进的。经过几十年的航天技术发展, 全球相关技术已获得显著进步与突破, 我国也累积了坚实的技术基础。综合考量后, 技术专家和决策者确定了“绕、落、回”三步走的探月发展战略, 旨在全面构建和提升我国的月球探测技术能力。

国内形势方面, 登月一直是中国人的梦想, 这一梦想在中国古代文学作品中的嫦娥奔月故事中便已有体现。自1992年前后, 国内已有科学家提出了“嫦娥奔月”的构想, 并形成了文字报告提交给中央政府。尽管该报告因科学价值未被充分认可而被否决, 但科学界对探月的规划与追求从未停歇。为了确保嫦娥探月工程计划的顺利实施, 相关专家和机构持续开展了立项论证工作。尽管在90年代初期和中期, 我国两次探月方案的论证都未能立即得以实施, 但探月系统的研发部门和主管部门在整个90年代都始终致力于探月工程建设的规划与论证工作。经过多年的技术积累, 我国已经具备了坚实的技术基础, 例如长三甲火箭的高成功率、东方红三号卫星平台的稳定性, 以及地面VLBI台站的建设等。此外, 随着国家中长期科学技术发展规划的出台, 政府部门在发展规划中明确强调了嫦娥探月工程的建设及其重要性。中国航天科技集团也相继推出了《“十一五”规划》(2006年2月)^[11]、《“十二五”规划》(2011年6月)^[11], 2007年10月18日, 《航天发展“十一五”规划》就探月工程做出专门规划^[12]。

国际形势方面, 存在国际科技竞争、太空竞赛, 美国、俄国、英国、德国、印度、日本等多国相继出台了探月计划^[13], 并在积极实施中, 掀起了第二轮探月热潮。印度、英国、俄国、德国等2007年初的登月计划加速了我国探月工程的立项。其中一个直接原因是面临印度宣称即将进行月球探测的紧张形势^[6], 自20世

纪60年代美国和苏联成功发射载人宇宙飞船后,中国和印度之间的竞争焦点逐渐转移到发射无人宇宙飞船上^[14]。印度曾宣布计划在2005年独立发射小型无人月球卫星,并在2008年发射其自行研制的第一艘飞船“月球飞船一号”^[15]。若该计划成功,印度将成为第三个探测月球的亚洲国家。根据联合国的月球条约,月球空间没有国家边界之分,也不预先设定政治边界,而是遵循“先到先得”的原则。因此,各国都在争先恐后地进行探月活动。在当时国际探月的形势下,继美国和苏联之后,多国已经加快了探月的步伐。如果印度作为亚洲国家先于我国进入月球,我国无论在月球科学探索还是政治局势中都将面临一定的威胁。因此,我国必须加快行动^[15]。这些因素共同促使我国的嫦娥探月工程计划加快实施,尽早实现探月目标。作为一项国家战略工程,探月工程深受国际形势以及国内外政治经济环境的影响。

基于上述介绍和分析,可以得出结论:“三步走”发展战略的形成是由探月活动的内在规律、国际国内形势的发展变化等多重复杂因素共同促成的。与其他卫星工程相比,嫦娥探月工程的难度系数更大,因此需要在成本、风险和收益之间取得平衡。为了实现这一目标,工程从一开始就精心规划了每一步的技术任务目标与路径。在具体实施过程中,工程项目进行了分级规划,首先制定了“三步走”的总体战略。然后,具体到各个型号任务时,又进行了进一步的细分和规划。例如,在探月二期工程中,任务被细分为嫦娥二号和嫦娥三号两次任务,其中嫦娥二号作为二期工程的先导星,而嫦娥三号则是二期工程的主任务。整个工程按计划稳步推进,每一步都是基于前一步的成果,并在实施过程中不断尝试超越和深化,从而为下一步奠定坚实的基础。

2 嫦娥探月工程一期开启绕月实践

对月球的科学探索早在20世纪60年代中期就已开始。美国在1978年成功登月后,曾赠送中国1g从月球带回的岩石样品,其中0.5g被我国用于科学研

究^[6]。中国的探月工程论证工作可以追溯到“863计划”时期。在1991年实施该计划的过程中,闵桂荣院士提议并组建了月球探测课题组,他建议研制月球卫星,这一提议极大地推动了我国的探月工作^[16]。吸取曾在1992年提案的探月计划因缺乏有深度的科学价值被否的经验教训,这次由科学家欧阳自远领衔论证呈报探月科研报告,探月计划提议1994年获得通过,并获批经费^[15]。探月工程的先期科技攻关于1998年启动,各项任务也进入了正式规划论证阶段。从2002年开始,课题组经过两年多的综合研究,结合我国的技术和经济实力,提出了首先进行绕月探测的方案。大型工程项目在正式立项前通常需要进行预先研究,探月工程也遵循了这一流程。在立项前的预发展攻关过程中,需要明确技术细节,并决定第一步的实施策略以及需要攻克的关键技术。2003年2月28日,国防科工委在探月工程预发展会议上,明确了探月工程系列型号核心技术的预研项目,并启动了相关任务^[16]。2003年6月,时任国务院总理温家宝批示建议在国家中长期科技发展规划编制中纳入并充分论证探月工程。同年9月,他主持召开中央专委会,讨论决定同意实施探月工程,并将二、三期工程纳入国家中长期科技发展规划^[17]。探月工程一期“绕月”最终于2004年1月23日获批立项。在中国政府的支持下,国家航天局组织了一系列的研究与评估,确认了月球探测任务的重要战略意义。经过深入论证和严格审查后,嫦娥一号任务得以立项,整个探月工程被命名为“嫦娥”。

2004年2月19日成立绕月探测工程领导小组,3月15日绕月探测工程领导小组举行第一次会议(以下简称领导小组会),任命工程总指挥、总师等,落实五大系统^①组织建设,五大系统分别建立两总系统^②^[9]。人员确定后,开始制订总体技术方案、总体设计方案,并通过第二次领导小组会,工程总体进入初样阶段。一个月后,党中央专门听取了月球探测工程进展汇报,对工程进展给予充分肯定,并提出了明确要求,给予全体研制人员以极大信心与鼓励^[18]。2005年2月4日,中央政治局常委会议上听取月球探

① 五大系统:地面应用系统、发射场系统、卫星系统、运载火箭系统、测控系统。

② 两总:总指挥、总师。

测工程进展情况汇报。工程原计划是按照“一星一箭”来安排的,考虑到月球探测工程本身在科学上的风险性和不确定性,会议果断决定:再增加一颗“备份星”。并最终在12月29日第三次领导小组会商议确定绕月工程阶段进入正样研制^[19]。

2006年,根据新的发射要求,相关场所经历了改造、建设和验收。随后,验收与对接试验也陆续展开。首先进行的是综合测轨试验,该试验运用了欧洲航天局的SMART-1探测器。紧接着,正样对接测试试验顺利完成。此后,还依次进行了热真空试验、整星热平衡试验、星箭对接试验以及分离试验^[20]。

嫦娥一号的远距离发射面临了诸多难点,经过系统优化和经济可靠性的考量,最终选择了长征三号甲火箭作为发射工具。长征三号甲火箭在过去的14次发射中全部成功,被誉为当前最可靠的运载火箭,同时具备出色的适应能力。2007年,发射工作开始实施。嫦娥一号发射窗口期领导小组经过多次会议讨论和调整,同时时任国家领导人也视察了工程进展。根据上级机关的要求,最终确定了10月24日为发射窗口期。针对这一调整,需要进行新一轮的技术综合论证,涉及嫦娥一号卫星评估、全尺寸比例的全过程演练,以及出厂、进场等相关工作,重点在于飞控准备和质量检测。10月24日,嫦娥一号成功发射,于10月31日与月球交会,11月5日被月球捕获,两天后精准进入月球轨道。2007年11月26日,具有象征意义的语音和歌曲传回地面,并陆续发布首幅月面图像^[21]、月球极区图(2008年1月31日)、月球影像(2008年11月12日)^[22]。2009年3月,嫦娥一号执行受控撞月,精准落入东经52.36°、南纬1.50°的月表区域。

嫦娥探月工程从正式立项到成功发射,历时不到3年,这在航天器研制历史上是相当罕见的。该工程不仅成功实现了首飞,更在技术上取得了九大重大突破,具体包括集成技术、轨道设计技术、远距离测控通信技术、高精度测定轨技术、火箭可靠性增长技术、高可靠发射技术、月球科学探测技术、数据接收与研究技术,以及能源和环境技术。嫦娥一号成功实现了首次绕月探测,获取了全月面的立体图像和第一

幅月面图像,并测定了月表14种元素的含量。

综上所述,嫦娥一号探月工程的成功得益于前期成熟的技术和产品支撑,以及多次航天工程项目的经验指导。其战略决策和立项过程经过了深入研究和充分论证,整个工程耗时短,技术特点彰显了中国航天领域的先进水平。这不仅是科学技术工程发展的重要标志,更是中国综合国力的体现。该工程的成功为中国航天事业的发展树立了新的里程碑,同时也为人类对月球和太空的探索提供了宝贵的科学数据和经验。

2007年10月24日,长征三号甲火箭运送嫦娥一号绕月探测器,即我国第一个月球探测器进入太空,拍摄的第一幅月面图像于同年11月20日传回^[23],这是继东方红一号人造地球卫星、神舟五号载人飞船之后,又一个里程碑^[24]。获取的月球图像、月表元素成分、近月空间环境等一批研究数据,填补了中国在探月领域的空白^[25]。随着一系列科学任务的顺利完成,嫦娥一号圆满完成了其历史使命:它不仅填补了中国探月领域的空白,展现了中国进入太空的能力,体现了国家的综合实力;同时,也开启了中国全面探测月球的新篇章,为后续探月工程的实施提供了有力的前期保障。

3 嫦娥探月工程二期系统融合创新

为了积累探月工程经验并降低月面软着陆的技术风险,嫦娥二号卫星在2008年10月被正式确定为二期工程的先导星。其原型是探月工程一期中嫦娥一号的备份星。在被确立为二期先导星后,立即开展了部分关键技术的试验验证,以进一步推进月球探测技术的验证与研究。探月工程的二期项目在2008年2月已经获得批准立项^[5]。6月,国防科工局(原国防科工委,下同)专题会议上,确定对嫦娥一号备份星进行改进,命名该任务为嫦娥二号。10月1日,嫦娥二号卫星发射成功。次日,嫦娥二号卫星实施轨道中途修正,首次即获成功^[13]。由于此次轨道修正效果良好,原计划于10月3日、5日进行的轨道修正动作相继取

消。在10月6日、8日、9日成功实施三次近月制动。10月15日,六种有效载荷^①,除CCD立体相机外已全部开机,在轨测试完成后将陆续开展科学探测^[26]。10月16日,结束通信链路测试^[27]。10月26日,嫦娥二号卫星按照预定轨道降入,完成图像拍摄准备。卫星虹湾区成像任务在10月29日完成。卫星通过实施升轨控制,近月点返回100 km^[13]。2010年10月30日,对卫星实施轨道维持,使其返回100100 km的环月工作轨道。2010年11月2日,工程测控系统主任务系统成功切换至长期管理任务系统。2010年11月8日,国防科工局公布嫦娥二号月面虹湾局部影像图^[28]。

嫦娥二号圆满完成四大科学探测任务和六大工程目标,半年设计寿命于2011年4月1日期满^[29]。2011年4月下旬至5月底,开展了补拍月球南北两极漏拍点和再次对嫦娥三号预选着陆区进行高清晰成像两项拓展试验。8月25日,准确进入日地L2点(拉格朗日)^②的环绕轨道,从月球轨道出发在世界上也是首次^[13]。2012年12月13日,飞离L2点约200天的嫦娥二号卫星,与Toutatis小行星交会,并拍摄了小行星高清晰图像^[30]。距地球间距离不断刷新,分别于1月、2月、4月、5月、7月相继突破1000万、2000万、3000万、4000万、5000万km,嫦娥二号卫星已成为我国首个人造太阳系小行星^[30]。

嫦娥二号首次实现“一探三”,是我国唯一的一颗绕太阳飞行的人造行星^[6]。嫦娥二号取得以下技术突破,包括:飞行技术、地月转移轨道、测轨技术、成像技术、深空测控体制、远距离测控与通信技术。它是我国第一个行星际探测器,首次实现了我国对小行星的飞跃探测。我国是世界上第三个实现日-地L2点的国家,并获取了7 m全月图,4179小行星实拍图。

嫦娥三号于2008年2月正式立项。在历经了方案设计、初样研制、正样研制三个阶段,共耗时5年6个月后,项目团队进行了大量的专项试验。在通过了第十一次小组会议的评审后,项目由研制建设阶段转入发射实施阶段。嫦娥三号携带的主要是新研发的产品。为了确保任务的顺利完成,在探月工程领导小组

和总体部之外,还特别成立了五支专家核心团队,构建了三级组织体系。团队围绕着“落月”的目标,展开了独立的风险评估,特别关注月球特殊地貌等潜在风险,以确保计划能够按时完成。嫦娥三号的主要任务是实现在月球的“落月”。2013年12月2日,嫦娥三号卫星成功发射,并于12月6日抵达月球轨道,这标志着嫦娥三期工程的第二阶段,即“落月”阶段的开始,这也是探月工程二期的核心任务。

为了完成三期工程第二阶段的任务,嫦娥三号需要在着陆和月面适应等新技术上取得突破。为此,团队准备了五个备选的着陆场以应对降落过程中的各种情况。最终,嫦娥三号在七个方面取得了重大技术创新,包括多学科联动技术、月球软着陆技术、地外天体巡视技术、高精度入轨技术、深空测控通信技术、巡视探测和月面就位技术以及月夜生存和光照自主技术。嫦娥三号实现了首次研制的高水平特种试验设施,保障了安全着陆,并首次实现了全自主避障的软着陆技术,从而结束了世界上盲降月球的历史。同时,嫦娥三号还在月球上开展了“测月、巡天、观地”的科学探测活动。

通过嫦娥二号和嫦娥三号的任务实施,中国对月球着陆点区域进行了详细的勘察,并在月球探测领域取得了显著的进展。这些成就不仅体现了战略决策的智慧,也展示了科学技术的创新,提升了中国航天事业在国际上的声望。在嫦娥探月工程一期、二期进行的同时,三期计划也在稳定推进中。三期工程的目标是实现“返回”,目前相应的采样返回器已经进入方案设计阶段。虽然技术难度很大,但随着技术的不断完善和创新,中国嫦娥探月工程三期任务将继续深入进行。

4 嫦娥探月工程三期再创新高收官

按照三步走战略部署,嫦娥探月工程的三期目标是实现“返回”。此前,仅有苏联成功实践过无人月球采样返回技术,采用的是月面直接起飞返回地球的方案。而嫦娥五号则启用了月球轨道无人对接的新方

① 激光高度计、 γ 射线谱仪、X射线谱仪、微波探测仪、太阳高能粒子探测器、太阳风离子探测器。

② 卫星受太阳、地球两大天体引力作用,能保持相对静止编号为L2的那个点。

案,这一创新涉及到工程、技术与管理方面的全面进步,是在经过设计分析和78项大型试验后得以实现的。嫦娥五号的发射过程引发了公众的广泛关注,发射前、发射时、发射后的实时宣传报道激发了科普热潮,知乎上有579万网友围观,12万网民为“嫦娥五号”奔月助力,展现了科技创新与科学普及的协同发展。

为了更好地衔接嫦娥探月工程的一、二期,并考虑未来深空探测和载人登月的发展,二期工程在2009年实施时,就已经开始了嫦娥探月工程三期的方案论证和预先研究。三期工程在2011年正式立项,规划了包括嫦娥五号和嫦娥六号两次正式任务,以及一次高速再入返回的飞行试验任务。与一、二期工程相比,三期工程的挑战更大,因为不仅需要实现停留,还要完成取样返回。这需要飞行器在飞行过程中不断更换姿态,并增加了轨道器、返回器、上升器等设备。同时,三期工程需要适应更为复杂的太空环境,工程难度显著提升。为了确保技术的可行性与可靠性,在正式发射前,先发射了一颗探路星进行实际验证。2014年10月24日,长征三号丙运载火箭成功发射了探月工程三期的嫦娥五号T1航天器,并准确进入了地月转移轨道^[7]。2014年11月1日,探月工程三期再入返回飞行试验器取得圆满成功。

嫦娥探月工程三期月地高速再入返回任务取得六个方面重大技术创新:第一,月地高速返回再入试验,验证了第二宇宙速度月-地精准返回地面的能力;第二,建立了深空跳跃式高速再入返回跟踪测量和搜索回收系统^[31],实现了国内最大速度、最长航程、最大范围和精度最高的测控回收^[31];第三,高精度返回,使用小升阻比返回器在国际上是首例;第四,双平台飞行器系统,首次实现了多目标探测、多次月地往返^[29];第五,突破了高速再入返回气动设计与验证技术,全面提升了我国对高空稀薄大气与高速飞行器间的物理和化学作用机理的认识水平;第六,突破了高速两次再入大气层热防护技术,烧蚀材料的密度处于国际领先水平^[7]。

嫦娥五号月球采样返回探测器于2020年11月24日发射,成功携带月球样品返回^[32],我国成为世界第三个成功在月球采样返回地球的国家。嫦娥五号突

破五个“首次”:无人交会对接、月面自动采样、月面起飞、取样返回,以及有了本国的月球样品研究系统^[25]。嫦娥探月三期工程达到对月球采样区域的精细勘查,标志着中国月球探测技术达到新高度。

5 嫦娥探月工程四期未来展望

嫦娥探月工程三期任务完成之后,四期工程任务目标逐渐确定。嫦娥四号作为探月工程四期第一步开始启动。嫦娥四号原是嫦娥三号的备份星,其设计基本同于嫦娥三号,考虑到嫦娥三号软着陆的复杂性,备选了嫦娥四号的替代方案,一旦嫦娥三号任务出现失败,将立即启用嫦娥四号完成“落”任务。因为嫦娥三号顺利完成任务,嫦娥四号重新调整方案。尽管关于嫦娥四号是否发射以及发射在哪里一开始就存在不同声音,但因有叶培建等科学家的坚持,经过多轮论证,最终决定执行新的任务,在月背面着陆,进行月背巡视与探测,开展月基低频射电研究。在月背着落也曾遭到了多方质疑,毕竟月背环境复杂,能着陆的位置有限,没有任何一个国家曾经到达过月背,甚至美、欧也只是设想并未实施。经过多主体多方论证及战略科学家的坚持,最后决定进行人类的第一次尝试,取得了很好的效果,实现了效益最优。这一创举是立足于科技自立自强,体现了国家意志在科技创新领域的战略布局与政策导向,其成功着陆同时展示了战略科技力量支撑创新型国家建设和社会进步的能力。

嫦娥四号2018年12月发射,2019年1月落在月球背面南极-艾特肯(South Pole-Aitken,SPA)盆地内的冯·卡门(Von Kármán)坑,这是人类历史上首次到达月背面,国际上首次进行低频射电天文观测,同时积极开展国际合作,搭载了荷兰、德国、瑞典三台载荷,利用月背独特的屏蔽地球无线电干扰的环境,开展了低频大尺度辐射特性研究,超长波的探测具有重要价值。四年多来,嫦娥四号成果丰富,促进了多学科发展,研究者在*Nature*、*Science*等期刊发表大量原创科学成果。嫦娥四号获2020年度国家科学技术进步奖特等奖、国际宇航联合会世界航天奖。

嫦娥六号任务于2024年5月3日发射成功,搭载

法国、欧洲航天局、意大利、巴基斯坦的载荷和卫星项目, 着陆区定位于月球背面南极-艾特肯盆地。嫦娥七号探测器拟于2026年左右发射, 计划在月球南极进行一次综合探测。嫦娥八号计划于2028年前后实施发射, 将与嫦娥七号等共同组成月球科研站基本型。中国国家航天局正式发布嫦娥八号国际合作机遇公告, 并与阿塞拜疆航天局签署联合声明, 标志着阿塞拜疆正式加入国际月球科研站计划^[31]。

6 创新成就及启示

嫦娥探月工程起步晚但起点高, 经费投入少但科技产出多, 发射次数少但成功率高^[33], 该工程在创新和经验方面取得了显著的成就。

第一, 在组织管理模式上, 嫦娥探月工程实现了新突破。它构建了一个全新的三级组织体系, 涵盖探月工程领导小组、探月工程总体部以及专家核心组, 推动了系统、技术、管理的协同创新。嫦娥探月系统的工程由运载火箭系统、探测器系统、测控通信系统、发射场系统、地面应用系统五大核心系统组成, 并特别增设了五大专家组。其“三步走”的战略规划, 每一步都要求重大技术的突破与跨越, 同时也是对前一步的衔接与继承。每一步任务的完成, 都达到了国际先进水平。该工程坚持产学研协同创新, 实现了多部门跨领域的协同工作, 多学科集成贯穿设计、生产、试验到发射和在轨运行的各个环节。同时, 它也坚持开放合作与共享创新, 开创了“一主多国”的高科技合作新局面。在嫦娥探月工程任务成功后, 还允许他国科学仪器搭载, 实现了数据共享。

第二, 在空间科学探测方面, 嫦娥探月工程已经实现了从跟跑、并跑到部分领跑的转变。其重要成果包括但不限于: 揭示了地球周围的等离子体层分布, 绘制了全月球月壤厚度分布图, 发现了太阳风离子加速现象和月球深部幔源物质, 首次拍摄到月球背面的清晰形貌, 揭开了古老月背的神秘面纱。此外, 该工程还在月球上种植出第一株植物, 首次单人无人采集了1731 g月壤返回地面, 并发现了20.3亿年前形成的玄武岩和一种新的月球矿物——“嫦娥石”。

第三, 领军和领导人才在创新中发挥了引领作

用。总设计师亲自领衔, 汇聚了一批具有丰富系统工程经验的领军人才, 他们曾参与过资源遥感卫星、东方红通信卫星及载人飞船等系列型号的研制。这样的团队不仅经验丰富、精明强干, 还积极吸纳了具备新知识、有闯劲的年轻人作为技术骨干, 并在工程实践中对他们进行培养。通过嫦娥一号至五号的技术攻关和研制, 这个团队的年龄层次更加合理, 专业技术水平整体提升, 综合能力更强, 技术研究也更具创新性^[5]。

第四, 科技创新与科学普及实现了协同创新。航天科普已成为重要的科普资源, 引发了公众的太空科普热情。公众的参与不仅提升了自身的科学素养, 也进一步推动了航天创新的发展。嫦娥一号探测器的成功引发了公众对航天的兴趣, 而嫦娥二号、三号的发射直播, 以及月球探测载荷创意设计征集活动的公众投票等环节, 更是推动了航天科普的升级。

第五, 走中国特色探月之路, 形成了具有时代特色的探月精神^[34], 这丰富了航天精神的内涵。值得一提的是, “广寒宫”“天河基地”等27个富含中国文化元素的名称被永久地命名在了月球上。

第六, 助推中国国际地位的提升。空间科学探测实现多个首次, 取得多项新发现: 发现了地球周围等离子体层的变化规律, 引起国际高度关注; 获得国际首幅月球正面和背面地质剖面图; 氦-3、铀元素的地质分布数据被国际同行广泛采用; 月球背面甚低频天文观测填补了国际空白^[4]。获得大量月球原始科学数据, 使我国月球科学研究迈入了世界前列。搭载了四个其他国家载荷, 面向世界作出了中国表率。

通过回顾嫦娥探月工程, 可以获得以下几点启示: 第一, 战略高科技领域的成功立足于科技的自立自强。中国航天正是高科技自立自强的典范, 而嫦娥探月工程则是其杰出的代表。该工程通过不断的创新和技术突破, 完全依靠自身力量实现了探月的壮举。这一经验对于其他战略高科技领域来说, 无疑具有重要的借鉴意义。第二, 新型举国体制在嫦娥探月工程的顺利实施中发挥了关键作用。该工程涉及领域广泛, 规模宏大, 得益于集中统一的领导和众多国家军工企业、高校、科研院所的共同参与。同时, 市场活力的充分激发和优势民营企业的加入, 使得“竞争择

优、协同创新的新型举国体制”^[35]得以充分体现其效能。第三,嫦娥探月工程展现了复杂性、整体性、系统性的融合创新。这一工程的特点在于它集成了复杂的多学科高技术,并打破了传统航天工程的分解与集成分开思想,通过任务分解与综合的并行进行,加快了研制进程,提高了工程效率。第四,嫦娥探月工程始终追求整体最优。它以经济、可靠、安全、有效、成熟技术的理念为指导,注重多学科知识的基础创新与运用。通过分阶段、多目标优化任务,工程确立了“工程目标实现为主,科学目标为辅”^[36]的策略。在面对高风险时,工程团队运用底线思维,对各种可能出现的风险进行评估,并制定相应的预案和备用方案,以确保任务的成功。同时,为了降低风险,工程选用了成熟技术,如第一次探月的嫦娥一号就选

择了经过多次成功发射验证的长征三号甲火箭进行运送。第五,适合国情的发展战略对重大工程来说也至关重要。嫦娥探月工程在立项前进行了长年的综合论证和预研工作,这是航天产业区别于其他产业的独特之处。通过预研和试验确定可行的试样,使得新工程中运用新技术时能够做到可靠有保障。这一过程不仅积累了技术,还为实现技术跨越奠定了基础。第六,在重大工程的论证过程中,多主体决策有助于实现效益最优。例如,在嫦娥四号项目中,航天部门、财务部门、技术部门、评估小组和领导小组等多方共同参与决策过程。这种多主体论证的方式不仅优化了设计过程,还在嫦娥三号完成使命后快速实现了嫦娥四号的价值最大化。同时,嫦娥三号的成功运用还为其他重大航天器管理提供了有益的借鉴。

参考文献

- [1] 2021 中国的航天[EB/OL]. (2022-1-28) [2024-4-30]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758824/n6758845/c10006721/content.html>.
China's aerospace in 2021[EB/OL]. (2022-1-28) [2024-4-30]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758824/n6758845/c10006721/content.html>.
- [2] 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)[EB/OL]. (2006-02-13) [2024-4-30]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm.
Outline of the National Medium- and Long-Term Science and Technology Development Plan (2006—2020) [EB/OL]. (2006-02-13) [2024-4-30]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2006/content_240244.htm.
- [3] 叶培建, 于登云, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器的成就与展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(4): 323-333.
Ye P J, Yu D Y, Sun Z Z, et al. Achievements and prospect of Chinese lunar probes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 323-333.
- [4] 勇攀科技高峰 服务国家发展大局 为人类和平利用太空作出新的更大贡献[N]. 人民日报, 2021-02-23 (01).
Bravely climb the peak of science and technology, serve the overall development of the country, and make new and greater contributions to the peaceful use of space by mankind[N]. People's Daily, 2021-02-23 (01).
- [5] 叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(6): 543-558.
Ye P J, Huang J C, Sun Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(6): 543-558.
- [6] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405-416.
Wu W R, Liu J Z, Tang Y H, et al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405-416.
- [7] 于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述[J]. 深空探测学报, 2016, 3(4): 307-314.
Yu D Y, Wu X Y, Wu W R. Review of technology development for Chinese lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 307-314.
- [8] 欧阳自远. 嫦娥一号卫星的初步科学成果与嫦娥二号卫星的使命[J]. 航天器工程, 2010, 19(5): 1-6.
Ouyang Z Y. Science results of Chang'e-1 lunar orbiter and mission goals of Chang'e-2[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(5): 1-6.
- [9] 栾恩杰. 泊然思絮: 栾恩杰论文选编[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2022.
Luan E J. Boran Sixu: Selected Papers of Luan Enjie[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2022.
- [10] 《中国的航天》白皮书[EB/OL]. (2000-12-1) [2024-4-30]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758824/n6758845/c6772480/content.html>.

- White Paper on China's Aerospace(2000 Edition) [EB/OL]. (2000-12-1) [2024-4-30]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758824/n6758845/c6772480/content.html>.
- [11] 张永龙. 战略规划在军工企业集团的应用——航天科技集团公司战略规划制定与实施初探[D]. 北京: 北京大学, 2009.
Zhang Y L. Application of strategic planning in military industrial enterprise groups: Aerospace Science and Technology Group Corporation's strategic planning and implementation[D]. Beijing: Peking University, 2009.
- [12] 航天发展"十一五"规划[EB/OL]. (2007-10-18) [2024-4-30]. https://www.gov.cn/gzdt/2007-10/18/content_779281.htm.
The "Eleventh Five-Year Plan" for aerospace development[EB/OL]. (2007-10-18) [2024-4-30]. https://www.gov.cn/gzdt/2007-10/18/content_779281.htm.
- [13] 中国探月工程大事记[EB/OL]. (2013-11-27) [2023-11-10]. https://www.gov.cn/jrzg/2013-11/27/content_2535762.htm.
Memorabilia of China's lunar exploration program[EB/OL]. (2013-11-27) [2023-11-10]. https://www.gov.cn/jrzg/2013-11/27/content_2535762.htm.
- [14] 人类能源的新希望: 可燃冰/嫦娥计划及其意义[J]. 山东国土资源, 2005, 21(12): 59.
New hope for human energy: Combustible ice/the Chang'e project and its significance[J]. Shandong Land and Resources, 2005, 21(12): 59.
- [15] 航天事业小资料[J]. 今日科技, 2004(5): 5.
Small information on aerospace industry[J]. Science & Technology Today, 2004(5): 5.
- [16] 刘建忠, 欧阳自远, 李春来, 等. 中国月球探测进展(2001—2010年)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 544-551.
Liu J Z, Ouyang Z Y, Li C L, et al. China national moon exploration progress(2001-2010)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(5): 544-551.
- [17] 郝哲. 东风指引 续梦广寒: 党中央关怀"嫦娥二号" 任务纪实[J]. 国防科技工业, 2010(12): 20-23.
Hao Z. The east wind directs the dream to continue and widen the cold—on-the-spot record of the CPC central committee's care for Chang'e II [J]. Defence Science & Technology Industry, 2010(12): 20-23.
- [18] 探月大事记2004[EB/OL]. (2015-03-25) [2023-11-10]. <http://www.clep.org.cn/n487137/n5989576/c5995390/content.html>.
Lunar Exploration Memorabilia 2004[EB/OL]. (2015-03-25) [2023-11-10]. <http://www.clep.org.cn/n487137/n5989576/c5995390/content.html>.
- [19] 探月大事记2005. [EB/OL]. (2015-03-25) [2023-11-10]. <http://www.clep.org.cn/n487137/n5989576/c5995395/content.html>.
Lunar Exploration Memorabilia 2005[EB/OL]. (2015-03-25) [2023-11-10]. <http://www.clep.org.cn/n487137/n5989576/c5995395/content.html>.
- [20] 中国航天史 [EB/OL]. (2008-04-29) [2023-11-15]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E8%88%AA%E5%A4%A9%E5%8F%B2>.
Chinese aerospace history[EB/OL]. (2008-04-29) [2023-11-15]. <https://baike.baidu.com/item/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E8%88%AA%E5%A4%A9%E5%8F%B2>.
- [21] 为"嫦娥奔月"喝彩[J]. 国土资源, 2009(3): 60-61.
Cheer for "the Goddess Chang'e Flying to the Moon"[J]. Land & Resources, 2009(3): 60-61.
- [22] 索阿娣. 中国航天电子技术研究院揭牌成立[J]. 中国航天, 2009(3): 7-8.
Suo A D. China Aerospace Electronic Technology Research Institute was unveiled[J]. Aerospace China, 2009(3): 7-8.
- [23] 东方星. 拥抱月球[J]. 知识就是力量, 2014(1): 16-21.
Dongfang X. Hug the moon[J]. Knowledge Is Power, 2014(1): 16-21.
- [24] 诸葛. 嫦娥工程揭秘[J]. 国际太空, 2016(10): 26-34.
Zhu G. Development of Chang'e project[J]. Space International, 2016(10): 26-34.
- [25] 庞之浩. 中国嫦娥探月工程之路回眸[J]. 科学, 2021, 73(4): 12-16, 4.
Pang Z H. China on the moon[J]. Science, 2021, 73(4): 12-16, 4.
- [26] 信息动态[J]. 卫星与网络, 2010(10): 35, 74-77.
Information dynamics[J]. Satellite & Network, 2010(10): 35, 74-77.
- [27] 信息动态2[J]. 航天器工程, 2010, 19(6): 126-137.
Information Dynamics 2[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(6): 126-137.
- [28] 索阿娣. 探月工程嫦娥二号任务圆满成功[J]. 中国航天, 2010(11): 5.
Suo A D. The mission of Chang'e II of the lunar exploration project was a complete success[J]. Aerospace China, 2010(11): 5.
- [29] 裴照宇, 王琼, 田耀四. 嫦娥工程技术发展路线[J]. 深空探测学报, 2015, 2(2): 99-110.

- Pei Z Y, Wang Q, Tian Y S. Technology roadmap for Chang'e program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(2): 99-110.
- [30] 《中国军转民》编辑部. 航天盛年多盛事"四大工程" 壮国威(上): "十二五" 国防科技成就系列报道之一[J]. 中国军转民, 2015(12): 15-26.
Editorial Department of *Defence Industry Conversion in China*. The "Four Major Projects" in the Prosperous Years of Aerospace (I): One of the series reports on the achievements of national defense science and technology in the Twelfth Five-Year Plan[J]. *Defence Industry Conversion in China*, 2015(12): 15-26.
- [31] 中国探月工程最新进展发布[J]. 太空探索, 2023(11): 5.
The latest progress of China's lunar exploration project is released[J]. *Space Exploration*, 2023(11): 5.
- [32] 蔡尚跃. 月球冲击坑浅层月壤温度场特征及演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
Cai S Y. Study on characteristic and evolution of regolith temperature field in lunar impact crater[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [33] 白杨. 进击的中国航天: 2020年不平凡征途[N]. 21世纪经济报道, 2020-06-24(2).
Bai Y. Attacking China's Space: An extraordinary journey in 2020[N]. 21st Century Business Herald, 2020-06-24(2).
- [34] 庞丹, 郭睿. 我国探月工程攻坚克难的成功典范: 中国空间技术研究院"嫦娥" 探测器研制创新回眸[J]. 中国航天, 2019(1): 30-36.
Pang D, Guo R. Review on innovation of CAST in the development of chang'e probe[J]. *Aerospace China*, 2019(1): 30-36.
- [35] 裴照宇, 王琼. 关于我国月球探测活动的工程哲学考察[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2022, 14(2): 142-151.
Pei Z Y, Wang Q. An engineering philosophical investigation on China's lunar exploration activities[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2022, 14(2): 142-151.
- [36] 王大洲. 中国大科学与工程史[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2022.
Wang D Z. History of China's Great Scientific Engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang Education Publishing House, 2022.

Practical History and Innovation of China's Chang'e Lunar Project

Wang Jingjin¹, Li Chengzhi^{1,2*}

1. *Institute for Advanced Study of Humanities and Social Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China;*

2. *Hangzhou Innovation Institute, Beihang University, Hangzhou 310000, China*

Abstract: China's Chang'e Lunar Project is an important milestone in making China stronger in the aerospace sector. This paper combs through the development history of China's Chang'e Lunar Project, analyzes the background of China's Chang'e Lunar Project's decision-making, the characteristics embodied in each stage of the construction process, focuses on the formation process and innovations of China's Chang'e Lunar Project's "three-step" development strategy, and conducts a preliminary discussion on the engineering, technological, and management innovations embodied in the development of China's Chang'e Lunar Project.

The "three-step" development strategy is based on complex and diverse factors such as the inherent laws of lunar exploration activities and the development and changes of the international and domestic situation. Different from other satellite projects, China's Chang'e Lunar Project needs to balance cost and risk. During the specific implementation, the project is planned at different levels. For example, the three-step strategy is formulated first. Secondly, specific missions are subdivided and replanned. For instance, the second phase of the lunar exploration project is divided into two missions, Chang'e-2 and Chang'e-3. Chang'e-2 serves as the flagship mission of the second phase of the project, and Chang'e-3 is the primary mission of the second phase. Progress occurs steadily as planned, with each step building upon the results of the previous one, and efforts are made to consistently surpass and deepen the previous step during implementation, thus laying a solid foundation for the next step.

A preliminary discussion was conducted on the engineering, technology, and management innovations involved in China's Chang'e Lunar Project. The three-level organizational system, multi-subject decision-making, third-party pre-risk assessment, coordinated development of scientific and technological innovation, and scientific popularization created by China's Chang'e Lunar Project are based on scientific and technological self-reliance and provide a reference for the implementation of future major projects.

By reviewing China's Chang'e Lunar Project, we can gain the following insights: First, the strategic high-tech field is based on self-reliance and achieved through science and technology. China's Chang'e Lunar Project has innovated and broken through many key technologies through self-reliance, achieving lunar exploration on its own strength. Second, leveraging the advantages of the nationwide system strongly supports the smooth implementation of China's Chang'e Lunar Project. The project covers a wide range of areas and is large-scale. It operates under the unified leadership of the central government and involves more than 2000 national military-industrial enterprises, universities, and scientific research institutes. This mobilizes market vitality and attracts the participation of advantageous private enterprises. Third, complexity, integrity, systematic integration, and innovation, as well as complex multidisciplinary high-tech integration, are characteristics of China's Chang'e Lunar Project. Fourth, the lunar exploration project aims for overall optimization, completing the project with the concept of pursuing economical, reliable, safe, effective, and mature technology, focusing on basic innovation and the application of multidisciplinary knowledge, and optimizing tasks in stages with multiple objectives. Employing a bottom-line approach to deal with high risks involves evaluating various potential risks, formulating plans and backup plans, and making every effort to ensure mission success. Choosing mature technologies helps reduce risk investment and shorten the cycle. Fifth, the formulation of development strategies suitable for national conditions is particularly important for major projects. Sixth, multi-subject decision-making in major project demonstrations can achieve optimal benefits. The aerospace department, financial department, technical department, evaluation team, and leadership group make decisions from multiple perspectives, report for approval, and initiate project development. The entire process involves different decision-making layers and different levels of optimized design, thus forming a multi-subject argument.

Keywords: Chang'e Lunar Project; engineering innovation; aerospace history