

引用格式:孙烈,李成智.美国“阿波罗计划”科技创新的得失.中国科学院院刊,2025,40(Z2):182-191,doi:10.3724/j.issn.1000-3045.20240703006.

Sun L, Li C Z. Scientific and technological innovation of Apollo Program and its gain and loss. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2025, 40 (Z2): 182-191, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20240703006. (in Chinese)

美国“阿波罗计划” 科技创新的得失

孙烈^{1*} 李成智²

1 中国科学院自然科学史研究所 北京 100190

2 北京航空航天大学 人文与社会科学高等研究院 北京 100191

摘要 “阿波罗计划”的首要成果是完成了空前壮观的探月旅行，其系列创新成就是人类科技进步的重要标志。在科学上，“阿波罗计划”取得了丰硕成果，极大地提高了对月球的科学认知水平；在技术上，该计划显著带动了集成电路等高新产业的发展；在工程上，美国航空航天局（NASA）形成了一整套的大科学工程的系统方法与管理经验。但“阿波罗计划”超前的方案与后续发展有所脱节。从美国新探月计划的实施来看，以阶段性举国之力形成创新和引领优势，并不能一劳永逸。拥有持续创新能力是争夺科技制高点的重要保障。

关键词 “阿波罗计划”，科技创新，大科学工程，持续创新，科研—军工联合体

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20240703006

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240703006

美国“阿波罗登月计划”（以下简称“阿波罗计划”）的首要成果是实现了人类千年的理想，完成了空前壮观的载人月球旅行。该计划的成功标志着美国在航天领域的载人登月竞赛中超越苏联，赢得了巨大的国际声誉。在人类科技发展史上，“阿波罗计划”

被公认为是一项具有划时代意义的大科学工程，取得了丰硕的创新成果^[1,2]。譬如，美国在计算机与集成电路领域取得的众多开拓性与产业化的双重优势，在很大程度上受益于此项登月计划^[3,4]。

“阿波罗计划”的实施，具有其特定的历史背景。

*通信作者

资助项目：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（E4291J06ZY）

修改稿收到日期：2024年12月21日

一方面，在二战后科技强国先后将太空领域视为全球科技制高点的战略要地；另一方面，美苏两国在冷战中的意识形态对抗日益加剧。1957年，苏联率先成功发射了世界上首颗人造地球卫星“斯普特尼克”号^[5]，令美国倍感压力。1961年4—5月，苏美在载人航天领域接连开展了一系列竞争^[6]，其间美国提出“阿波罗”登月的倡议，计划在20世纪60年代末实现载人登月。产生“阿波罗计划”的决策环境极为复杂。这项雄心勃勃的计划不仅仅只瞄准了科学技术的目标^[7]，美国将利用航空航天技术作为国家实力的象征，以维护国家形象为首要目标的研发行动做了广泛的科技动员。实际上，美国政府为实施这一历时近12年的大科学工程，动员了40余万人、约2万家公司、280多所大学和研究机构，花费了250多亿美元^[8]。除此之外，美国政府还进行了有效地组织与系统管理^[9,10]。

在“阿波罗计划”实施60余年之后，人类的探月活动再次升温。曾拥有唯一载人登月能力的美国，“重返月球”却面临诸多挑战。本文回顾“阿波罗计划”在科学、技术和工程3个方面的创新成就，并探讨持续创新能力对于抢占科技制高点的重要性。

1 科学探索：深入认识月球及其演化

“阿波罗计划”通过系列探测，划时代地改变了人类对月球的科学认知。“阿波罗”登月的科学任务主要是通过对月球表面地形、地貌和岩石特征的研究，了解有关月球起源、演化、月球地质特性和化学特性的种种问题，并确认月球上不存在包括微生物在内的任何生命。

1.1 首批月面科学实验

“阿波罗计划”的科学任务引人注目。从“阿波罗11号”首次登月开始，宇航员在月面上活动的一项重要工作是安放各类科学仪器，后续飞船的登月飞行，除安装各类实验仪器外，还考察了具有典型地质特征的4个区域^[11]，重要成就包括6个方面。

(1) **热流实验**。了解月球元素、温度变化及地质演化。用于测量某一区域从月球内部流至月面的热量，测量月球内部的热损耗率。科学家分析带回的岩石标本后，发现月球内部热量主要是内部的放射性元素衰变造成的，但“阿波罗15号”测到的热流值是0.75单位，比科学家预计的大1倍，迄今仍未得到很好的解释。

(2) **月面引力实验**。以月球和地球为引力天线探索引力波及其传播特性。实验装置主要是月面引力计(LSG)。“阿波罗”飞船先后携带的数个引力实验装置最后都未获得明确的结果，但仍加深了人们对引力波的微弱效应的认识。

(3) **月面大气成分实验**。用质谱仪测量月球大气的成分和气体密度。月球表面并非完全真空，从实测结果看，月球表面大气密度仅有地球海平面大气层密度的百兆分之一，且成分相当复杂。

(4) **月球抛射物和微流星实验**。测量到达月球的微流星的运动方向、速度和质量，以验证以前其他方法获得的结果。

(5) **月震轮廓实验**。确定月球地下上百米深的内部结构。主动月震仪安装后，曾测量到一次里氏3.5—4级的月震，估计是由一颗重达1吨的陨石碰击形成的。

(6) **激光反射器的实验**。实现高精度地月距离的测量。“阿波罗11号”和“阿波罗14号”任务部署的激光反射器由100块硅晶体反射器排成阵列，一共10排，每排10个。每块晶片磨光成直径5厘米、长45.7厘米的三棱镜，能反射来自多个方向的光线。测量的误差仅为0.15—1.5米，而过去测量的误差达几十米。激光反射器没有任何使用限制，来自各国的科学家都可以使用。

(7) **其他开创性实验**。此外，在登月活动期间，宇航员还开展了月球土壤力学实验、月球结构实验、带电粒子月球环境实验、太阳风质谱测量实验、超热粒子探测实验和月球表面的磁场强度测量、月球表面电性实验、月球通廊重力实验、月球中子探测实验及

宇宙线观测实验等。

1.2 理解月球演化

在月球上采集标本是重中之重的任务。经过6次登月飞行和科学探测，连同对带回的岩石进行分析，初步得出了4点认识。

(1) 月球背面和正面的月貌有很大不同。背面的高地和山脉比正面多，盆地似的海较少。月球演化史上曾经发生过猛烈的火山爆发。通过对月球环形山进行考察，科学家大致形成了两种环形山起源的看法：一种是火山喷发形成说，另一种是陨石撞击说。

(2) 月球地壳的厚度探测有较好的结果。“阿波罗12号”和“阿波罗14号”的着陆点的地壳厚度为25—70千米；“阿波罗17号”的着陆点的高度为25千米。月球内部大部分是固态的，至少在900千米以内都是坚硬的。根据月震数据估计，月球可能有一个月核，位于1000千米深处。月球表面有一层含有结晶岩碎片的多孔火山土壤，厚度几厘米到几十厘米，个别地区可达数米厚。月壤中有自然形成的玻璃。

(3) 月球上未见任何生命迹象。根据“阿波罗计划”6次登月的现场考察，科学家发现月球表面没有水、没有稠密大气层，极区很可能存在固态水。从带回的月岩中分离出氨基酸成分，但没有证据表明月球上存在过原始的生命。

(4) 月球的起源与地球有密切关系。数十年来，科学界研究“阿波罗计划”的实验数据和对月壤样本的分析从未停止。已经取得的共识主要有^[12]：月球不是原始天体，内部构造与地球相似；月球岩石与地球岩石一样古老，且依旧保存着原始形貌，月球起源被断定为46亿前；月球和地球由不同比例的共同物质构成，月球多数地区的岩石属于类似地球的玄武岩，也有斜长岩、长石、橄榄石、辉石和尖晶石，以及少量的铁矿石；与地球不同的是，月岩通过高温过程产生，基本上没有水的参与；月球表面覆盖风化层，由岩石碎片

和灰尘组成的碎石堆。总之，“阿波罗计划”给科学家提供了首次采样研究月球绝佳的机会，对月球的年龄、月球的物质成分、金属丰度、月球构造、月幔厚度、月球的生成和演化等重大问题都有了更深入的认识和了解。

1.3 排除“月球瘟疫”

美国航空航天局(NASA)在休斯敦中心建立了一个起隔离作用的月球返回接待实验室。在此密封空间内，设有物理学和生物科学标本实验室、地下辐射计算实验室，以及医务室、行政室和实验室附属区。目的就是为对从月球返回的宇航员、指令舱和标本进行隔离检查，以防止可能的“月球细菌”“毒素”和“放射粒子”构成的所谓“月球瘟疫”污染地球，也为了防止月球样品在科学检查前受到地球环境的污染，丧失原有的特性。

通过分析宇航员从月球带回的标本，科学家们确信月球上没有任何微生物，历史上也不曾有过微生物^[13]。由于当时对月球上是否有低级生命（如细菌、病毒等微生物）不了解。“阿波罗11号”等前几次登月飞行任务结束返回后，宇航员连同隔离车直接送到月球返回接待实验室，进行为期数周的彻底检查。到后来多次确信月球没有可怕的“月球瘟疫”后，这个隔离的步骤才省去了。

2 技术创新

“阿波罗计划”产生多项技术创新。例如，大推力液体火箭发动机、导航制导与控制技术、月球车技术、月球轨道交会法、大推力火箭发动机、全惯性导航系统、集成电路的基础研究与规模化应用等。其中，月球轨道交会法和集成电路分别代表工程导向和市场导向的不同创新模式，颇具代表性。

2.1 实施月球轨道交会法

(1) 月球轨道交会法是一项创举，影响深远。“阿

波罗计划”的登月方式最初只考虑直接登月法和地球轨道交会法,1962年年中最终选定的月球轨道交会法(Lunar orbit rendezvous),具有技术更合理、登陆更快,以及方案更经济等优点^[14]①。

(2) 月球轨道交会法一开始并不被看好^[15]。当时也有不同意见提出,能量收支是整个问题的关键,最好的办法是扔掉那些不再需要的东西,采用月球轨道交会法是载人登月的最佳途径,飞船质量可大幅减小。因此,合理方案的关键是研制模块化的航天器,每个独立的模块执行不同的任务^[16]。

(3) 月球轨道交会法能使技术“管理界面高度清晰”,为在10年之内完成登月提供了最关键的保证^[17]。经过多次争论,休斯敦载人太空飞行器中心于1962年2月论证了月球轨道交会法的多项突出的优点:能够提高有效载荷质量,降低月球着陆舱的质量,使得飞船的设计较简单,从而保证整个计划的进度和降低计划成本。最终,月球轨道交会法比直接登月法和地球轨道交会法节省约15亿美元,也减省了6—8个月研制时间。

2.2 带动集成电路发展

“阿波罗计划”对于推动集成电路发展产生了巨大影响。在集成电路发展史上,美国空军和NASA为集成电路的早期发展、使用和推广作出了重要贡献。微电子领域“革命”在很大程度上要归功于“民兵计划”和“阿波罗计划”,后者甚至可看作“从一开始就是为了利用集成电路的优势而规划设计的”^[18]。

(1) 推动集成电路产业化。在20世纪60年代初期,集成电路的主要用户仍然是空军和NASA。当时集成电路的价格高于单独购买分立元件的成本,因此民用市场缺乏买主。“阿波罗计划”前期预研项目“双子座计划”的制导和导航系统首先使用了集成

电路,使得NASA很快成为新器件的大用户。1962年,NASA在“双子座”和“阿波罗”系列飞船上使用仙童微逻辑集成电路,第一批就订购了上千块芯片,使该芯片价格迅速从76美元降至11.25美元。

(2) 引导集成电路向小型化和高性能发展。NASA关心集成电路的发展和应用,直接资助美国德州仪器公司开发小型计算机。NASA的运载火箭、通信卫星、气象卫星,以及“水星”“双子座”“阿波罗”系列飞船等航天设备都强调小型化,而通信、导航、控制系统的小型化又对电子技术和器件提出了更高的要求。集成电路在太空环境下最大的问题之一,是面对低温和强辐射时的可靠性较差。美国航天发射失败中大部分都是电子器件故障造成的,应用卫星的失灵也主要因为电子系统故障。1965年NASA设立微电子可靠性研究项目,制定了NASA全系统的微电子器件的标准和电子器件质量考核标准,奠定了集成电路朝向更小型和更高可靠性的发展方向^[19,20]。

(3) 促成集成电路的产学研结合。NASA设立新机构与商业公司合作,共同提高集成电路的加工工艺与可靠性。1961年NASA成立电子学与控制部,1964年NASA又设立了电子学研究中心。后者的选址距美国麻省理工学院很近,也便于集中美国哈佛大学、美国空军的剑桥研究实验室、电子学系统部等科研力量。电子学研究中心通过合同等方式委托工业界和学术界开展相关研究,改进集成电路的生产工艺。

(4) 重视基础电路的基础研究。电子学研究中心围绕技术创新开展的大量基础性研究也不可忽视,尤其是集成电路加工过程的物理和化学特性的研究,为P-N结离子注入提供新方法^[21]。此外,该中心在激光晶体光刻技术、集成电路测试技术、计算机集成电路辅助设计方面也有引领性的贡献。

① 月球轨道交会法利用“新星”号(Nova)或“土星”级运载火箭把飞船复合体先发射到月球轨道上。在飞临预先的登月点后,从飞船上分离一个小的登月舱,宇航员乘登月舱在月面上软着陆。当完成科学任务后,宇航员再乘登月舱返回轨道,与飞船主体会合对接。当宇航员回到飞船上后,抛掉登月舱,乘飞船返回地球。

(5) 带动信息产业的整体进步。“阿波罗计划”涉及大量复杂的计算问题,对新型电子计算机有迫切的需求。除了飞船使用的小型计算机外,NASA各地面控制中心和测控站则采用美国IBM公司的大型计算机,用于飞船飞行轨迹测量、飞行控制、数据监控及通信等^[22]。1970年NASA在评估对计算机技术发展的影响时认为:“在航天时代的头10年,美国计算机出口增长了1400%以上……在很大程度上,这也是NASA强烈的需求刺激推动了计算机产业的技术进步。”^[23]总之,“阿波罗计划”对信息技术的创新产生了重大影响^[22,24,25]。

3 工程创造

作为一项空前的“大科学”工程,“阿波罗计划”在系统管理思想、创新策略、机构调整、进度控制等方面,体现出前所未有的创造性。

这项太空探索计划涉及面极广。在科技领域,它涉及数学、物理学、天文学、生物学、心理学、材料及材料、电子、机械、控制、医学等几乎所有科学技术学科;在管理层面,它涉及政府、国会、军队、科研、教育、卫生等多部门,以及大量企业。不断出现的新技术与国内外形势的不确定性,对“阿波罗计划”的实施同时带来机遇和挑战。不难想见,工程实施必然遇到多种困难。

3.1 多路径创新战略的实施

“阿波罗计划”遇到的技术新问题很多,整个项目在总体上采取多路径技术创新与技术贮备的战略。

(1) 采用成熟技术的集成创新。“阿波罗计划”创新的最大的特点是集成创新。为保证登月这一应用计划的顺利执行,节省时间、节约经费并降低风险,“阿波罗计划”的一个重要原则是,尽可能采用成熟技术并突出简单性设计原则,不冒大的技术风险。关于如何运用成熟技术,时任NASA局长的韦伯强调:“‘阿波罗计划’中没有一项新发明的自然科学理论

和技术,全部工作都是现有技术的运用,关键在于综合。”^[26]这句话道出了“阿波罗计划”的一条基本的技术策略——对已有技术做集成创新。在火箭发动机研制过程中,工程师没有苛求运用新原理做开发,而是通过在已有方案中不断迭代,探寻出设计、制造、材料、工艺和试验等方面的综合最优方案,发动机的推力由原来的588千牛顿提高到6664千牛顿。本质上,采用成熟技术策略是基于已有技术的深度开发,能够降低研制风险,保障工程实施的质量与进度。“阿波罗计划”的项目管理专家认为,成功的方法在于:使用成熟技术、强调硬件可靠性、遵守安全标准,将事故充分暴露于地面试验阶段、简化操作、减少接口、最大限度利用已有成果与经验^[27]。

(2) 实施解决关键技术的并行策略。“阿波罗计划”存在大量的技术问题,NASA制定了多项并行的辅助计划,包括双子座载人航天计划和勘察者号月球探测器计划等。前一个主要用于发展和试验登月计划所需要的技术,包括燃料电池技术、长期生命保障技术、飞船交会与对接技术、计算机控制技术、飞船机动与变轨技术及舱外活动技术等,后一个则针对发射月球软着陆探测器、月球轨道飞行器深入了解月球表面物理和地质状况,为登月地点的选择提供依据。两个计划彼此独立,但内在各模块紧密联系,技术上可相互借鉴。并行策略的成功为“阿波罗计划”积累了技术,提高了研制效率和工程质量,为登月奠定了坚实基础^[15,28]。

(3) 鼓励用“试错创新”解决复杂技术问题。针对火箭的燃烧稳定性问题,从理论上突破对发动机燃烧室中燃烧现象和机理的认识,存在很大的困难和不确定性,而当时的计算机也不能进行这类非常复杂的计算。因此,在F-1和J-2发动机研制期间,大量的“试错”在所难免。喷嘴设计、隔板设计及推进剂输送方式设计等,都是逐个尝试可能的方案,出错或失败后,再修改、再试验,循环进行,直至解决燃烧稳

定性问题。火箭总体的纵向耦合振动（POGO）的解决也用了试错法^[14]。“阿波罗计划”在各个阶段都进行了大量试验，许多错误都是在试验过程中暴露出来并加以解决的，从而减少了实际飞行过程中的失误^[29]。

（4）**基础研究与应用开发相互牵引**。“阿波罗计划”本身既有基础研究的目标，又有产品开发的任务。NASA形成了一个鲜明的特点，各大研究中心的研究人员，既是科学家又是工程师，既参与工程开发工作，也开展基础性研究工作。他们参与工程开发工作，实际上是指导合作企业的研制工作，同步产生了一大批航空航天理论成果。这些理论用于指导“阿波罗”工程实际，解决工程中共性问题，提高了研制效率。

3.2 系统工程方法的引入

系统工程方法的采用，对于庞大的“阿波罗计划”来说至关重要。“阿波罗计划”运行之初，NASA“几乎没有任何管理系统”，甚至没有一个懂系统工程的管理人员。许多部门和工作组从他们各自的工作来说无可指责，但横向联系极差。随着NASA载人航天计划规模的扩大，新进了一批来自空军的高级管理人员和合作公司的管理者，他们从事过“大力神”洲际导弹、“民兵”洲际导弹和“北极星”潜射导弹的研制任务，正是这些工程项目在实施过程中，率先开发并采用了系统工程方法。系统工程方法的运用曾经使“曼哈顿计划”“北极星计划”和“民兵计划”取得成功，节约了大量时间和成本。1964年初，NASA载人航天飞行办公室改组，下设项目管理部、系统工程部、试验部、质量和可靠性部以及飞行控制部，同时要求各航天中心也相应成立这些部门^[9]。

（1）**发展出著名的“矩阵组织”管理技术**。整个项目通过对多系统项目的组织、人员、计划、进度和成本等因素进行综合考虑与控制。“矩阵组织”通过强有力的项目管理机构，形成全系统的沟通网络，明确职责分工，确定授权范围，明确研制与管理界面，

保障信息畅通和工作规范。项目管理部将研制全过程划分为编制计划、分析评价、控制指导和督促检查等阶段，并推广使用了电子计算机辅助科研与生产的管理。此外，工程人员将风险管理运用于项目管理中，采用失效模式和关键项目列表等方法对“阿波罗”飞船进行风险管理，效果显著。

（2）**发挥配置管理技术的显著作用**。这项技术是从美国空军引入的，被证明在发展民兵导弹时非常有效。配置管理是一组相互关联的管理过程、管理技术和支持工具的集合，目的是在登月项目的整个生命周期中维持配置的完整性和可跟踪性，标识系统在不同时间点上的配置，最终在时间节点上提交符合要求的产品或部件^[8]。

（3）**引入计划评审技术（PERT）**。该技术将一个大型项目分解成若干模块，描绘出项目包含的各种研发活动的先后次序，标明每项活动的时间或相关的成本。其源于美国国防部在研制“北极星”潜射导弹过程中开发的一项管理技术^[30]。马歇尔航天中心引入PERT技术，主要用于“土星V号”火箭的研制，使得工程中的进度、成本、更改、联系路径以及其他信息得以良好控制^[31]。

“阿波罗计划”的成功，充分显示了系统工程大规模运用的威力。

4 持续创新的困境

尽管成就巨大，“阿波罗计划”的策划与实施却一直存在隐忧，而体系庞大工程的戛然而止事实上影响了美国在探月领域持久创新能力的积累。

4.1 “阿波罗计划”的终止

（1）**政治包袱过重**。在制定登月计划之初，美国当局设定了一个不容失败且科学与政治高度捆绑的综合性目标——实现人类抢先登月，探索月球并且赢得与苏联的空间竞赛。该计划得到了科技界与产业界的广泛参与，以及政府各机构、国会和公众的大力支

持。然而，随着计划的不断推进，美国国际政治的优势并未因此而持续扩大。

(2) **经济效益不佳**。工程耗资过大，该计划占NASA预算的一半以上，单次任务投入高达26亿美元，而不间断的高投入和高风险，却并未带来预期的高回报。

(3) **社会影响减弱**。实际上，在1969年首次登月之后，美国公众兴趣就迅速减退，反对意见也逐渐增强，尼克松总统也有意削减此项预算。因此，“阿波罗计划”难以为继，被迫于1972年终止^[32]。尽管相关技术在航天飞机、空间站和星际探测等项目中得到了进一步的发展，但是“土星V号”火箭和“阿波罗”登月舱等关键设备及其核心技术，以及登月活动的指挥、运控、维护系统，连同大量的科研人员与企业，不得不终止了探月研究的迭代与持续发展。

4.2 “阿尔忒弥斯计划”的波折

在“阿波罗计划”停止载人登月45年后，2017年美国决定实施重返月球的“阿尔忒弥斯计划”。这个计划长期目标旨在月球上建立一个永久性基地，而不只是重建人类在月球上的存在，因此并非简单的“阿波罗”2.0版。截至目前，“阿尔忒弥斯计划”的实施并不顺畅，在决策、资金、研发与管理等环节，均出现问题。

(1) **“阿尔忒弥斯计划”面临美国载人航天政策的摇摆和预算上涨的难题**。① **美国既希望载人重返月球，也期待实现首次载人登陆火星，但孰轻孰重，难以抉择**。在2016年，特朗普就任美国总统后，他多次强调了美国重返月球和载人探索火星的愿景。2017年6月30日，特朗普签署了行政命令，要求重建美国国家航天委员会。为了彰显政府重返月球、加强火星探索的坚定决心，他在签署行政命令时邀请了NASA前高官和资深宇航员，包括首次登月的宇航员之一、已经87岁的奥尔德林，NASA前局长格里芬等人。特朗普宣称，美国应在20年内重返月球并在月球轨道上建

立空间站。他将月球轨道空间站命名为月球轨道平台门户。然而，他同时强调政府的重要目标是进行火星登陆研究，并主张将资金集中于火星任务。② **“阿尔忒弥斯计划”的预算压力持续上涨**。2019年以来，特朗普政府和拜登政府给航天系统的预算从210亿美元，已增至247亿美元。然而，鉴于重返月球计划的挑战性之高，而美国国会与行政部门在推进该计划的决心与预算增长之间存在显著矛盾，目前尚难以断言现有预算规模是否足以满足计划顺利实施的需求。

(2) **“阿尔忒弥斯计划”面临技术与工程的巨大挑战，仍可能导致整个项目进度的迟滞**。2022年11月，太空发射系统（SLS）火箭搭载“猎户座”飞船成功绕月飞行，此进展被广泛认为极为成功。然而，该计划自启动以来，已多次遭遇延期。具体而言，包括发动机传感器故障、飞行器型号更迭、后勤模块的移除、能源与推进组件（PPE）的推迟以及宇航服研发的延迟等问题，均使得NASA不得不数次推迟载人登月计划的实施。至于2026年是否能够按期实现载人登月，目前尚需进一步观察^[33]。

(3) **“阿尔忒弥斯计划”与“阿波罗计划”没有直接承继或转移的关系，美国正在重整载人航天的创新链**。人类曾经为“阿波罗计划”而构建的最完善、最先进、最复杂的航天系统已被废弃多年。尽管美国在航天领域的整体实力仍居世界领先地位，但自“阿波罗计划”结束后，包括“土星V号”火箭、“阿波罗”系列飞船、生命保障系统、应用系统等关键环节的研发与维护工作已停止；“阿波罗计划”的决策与指挥体系、研发系统、运维与辅助系统等都已退役或转型；而后续的航天飞机、国际空间站等载人航天项目，并未与前者形成直接的衔接。此外，政府主导的大科学工程如何整合或借助商业航天的力量，也需积累与探索。也就是说，与半个世纪前相比，新计划在目标、理念、方法等方面均发生了变化，其科学、技

术与工程创新体系与“阿波罗计划”的体系已相隔甚远。考虑到21世纪科技系统的巨大变革,“阿尔忒弥斯计划”所面临的创新挑战,其难度不亚于当年的“阿波罗计划”。

5 结论

“阿波罗计划”无疑是20世纪美国成功抢占科技制高点的标志性成就。其中涌现出大量的科技创新,有其深刻的时代背景,更与这项大科学工程出色地运行分不开。一个领域的创新能力,既不是一朝一夕就能掌握,也并非一劳永逸地长久占据。持续创新是赢得科技竞争的一项关键能力,这需从历史中汲取经验教训^[34]。

(1) “阿波罗计划”以举国之力获得成功,说明大科学工程的规划与实施应有符合国家利益的必要性。该计划曾得到美国政府、国会与军方的高度重视与大力支持,首要原因是符合美国特定背景下的国家战略需求。其中,既有国内外政治角力的迫切考量,也有赢得科技竞争的直接压力。美国设立的总统科学顾问委员会(PSAC)与NASA,实现抢先载人登月,可看作是美国政府与科技界达成的一项发展共识。然而,随后美国政策制定者与科学家之间的合作出现了弱化,国家利益更多地受到党派观点的牵扯^[7,35]。

(2) “阿波罗计划”能够取得科学、技术与工程的大量创新成果,与围绕项目形成的科研-军工联合体密不可分。“阿波罗计划”成功地与美国的陆海空三军、科研机构、高等教育机构、科技企业及政府部门等多方建立了良好的协作关系,并实现了明确的分工。这种联合体与传统意义上的军工复合体有所不同,后者通常由军队、军工企业及部分美国国会议员构成的利益集团,即所谓的“铁三角”。在参与“阿波罗计划”的科学家与工程师群体中,他们不仅认同该计划的政治意义,而且发掘了人类在科学探索、技术创新及工程创造方面的广阔创新空间。科研-军工联合体的目标

明确,科学家与工程师之间的关系并非单纯的从属与服从,他们的成就在很大程度上反映了对科学探索的共同追求。

(3) 不可持续性是隐藏于“阿波罗计划”之中的深层特性。该特征不仅体现在国家利益和政治意义的层面——其初衷具有过度强调竞争与对抗的倾向,同样也反映在科学、技术和工程的层面——其目标与经济基础的支撑之间存在脱节。“阿波罗计划”始终未能确立明确的经济盈利目标,并伴随着巨大的财政支出,这也是导致此类极端大科学工程难以持续的一个重要根源。一旦资金链、研发链、管理链、人才链和产业链的复杂创新网络长时间中断,相应的创新生态也将难以维系。即便此后经费投入更多、技术更为先进、企业更为强大,也未必能够迅速重建创新链。持续创新的困境,是“阿波罗计划”终止和“阿尔忒弥斯计划”面临挑战的一个关键所在。值得注意的是,美国当今引领的商业航天模式,发挥了企业持续创新的潜力,为解决庞大的太空计划难以持久的问题提供了新的思路。

20世纪下半叶以来,高技术领域已成为国际竞争最前沿和主战场,中国的发展亦曾面临科技创新的严峻挑战。不过,在资源有限和长期追赶中,中国在战略高技术领域摸索出颇具特色的发展举措。特别是“四个一代”,即“探索一代、预研一代、研制一代、生产一代”的发展模式,以及航天领域重大工程长期坚持的“三步走”战略,使得阶段性的“举国之力”,得以延伸为方向性的“持久耐力”,进而逐渐转化为产业整体性的“创新实力”。总之,战略高技术领域持续的创新力,离不开稳定而连续的创新链及其不断地迭代与升级。这些宝贵的经验与教训值得不断地总结和借鉴。

参考文献

- 1 Launius R D, Howard E M. NASA spaceflight: A history of

- innovation. London: Palgrave Macmillan, 2017: 89-218.
- 2 Gisler M, Didier S. Exuberant Innovations: The Apollo Program. Society, 2009, 46(1): 55-68.
- 3 Hall E C. Journey to the Moon: The History of the Apollo Guidance Computer. Reston: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1996: 1-5.
- 4 O'Brien F. The Apollo Guidance Computer: Architecture and Operation. New York: Praxis, 2010: 365-367.
- 5 Boris E C. Rockets and people, Volume 3: Hot day of the Cold War. The NASA History Series. Washington DC: NASA History Division Office of External Relations, 2009: 15-54.
- 6 Asif A S. The Red Rockets' Glare: Spaceflight and the Russian imagination, 1857—1957. New York: Cambridge University Press, 2014: 332-362.
- 7 Wang Z Y. In Sputnik's Shadow: The President's Science Advisory Committee and Cold War America. New Brunswick: Rutgers University Press, 2008: 3, 88, 155, 176-177, 249.
- 8 Drucker E E, Pooler W S, Wilemon D L, et al. Project Management in the Apollo Program: An Interdisciplinary study. New York: Syracuse University, 1972: 16, 43.
- 9 Johnson S B. The Secret of Apollo: Systems Management in American and European Space Programs. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2002: 23, 37, 64.
- 10 Pyle R. Innovation the NASA Way: Harnessing the Power of Your Organization for Breakthrough Success. New York: McGraw Hill LLC, 2014: 82-83.
- 11 AerospaceBendix. Apollo Lunar Surface Experiments Package, NASA N71-31607. Washington DC: Aerospace Systems Division, 1971: 3.
- 12 Anon. Top ten Scientific Discoveries Made During Apollo Exploration of the Moon. (2024-10-11)[2024-11-11]. <https://history.nasa.gov/ap11-35ann/top10sci.html>.
- 13 Hess W N, Calio A J. Apollo 11 Preliminary Science Report, NASA SP-214. Washington DC: NASA, 1969.
- 14 Roger E B. Stages to Saturn: A technological history of the Apollo/ Saturn launch vehicles, NASA SP-4206. Washington DC: NASA, 1980: 51-68.
- 15 Barton C H, James M G. On the Shoulders of titans: A history of Project Gemini, NASA SP-4203. Washington DC: NASA, 1977.
- 16 Courtney G B, James M G, Loyd S S. Chariots for Apollo: A History of Manned Lunar Spacecraft, NASA SP-4205. Washington DC: NASA, 1979.
- 17 James R H. Enchanted Rendezvous: John C. Houbold and the Genesis of the Lunar-orbit Rendezvous Concept, NASA-TM-111236. Washington DC: NASA, 1995.
- 18 Paul E C. A History of Modern Computing. Cambridge: The MIT Press, 2003: 188-190.
- 19 Lundin B T. Electronic Systems Program Review. Washington DC: NASA Headquarters, 1965: 30-32.
- 20 Andrew J B. NASA's Role in the Manufacture of Integrated Circuits// Steven J D. Historical Studies in the Societal Impact of Spaceflight. Washington DC: NASA, 2015: 149-250.
- 21 Hunsperger R G, Dunlap H L, Marsh O J. Development of Ion Implantation Techniques for Microelectronics, NASA-CR-111806. Washington DC: NASA, 1968.
- 22 James E T. Computers in Spaceflight: The NASA Experience, NASA-CR-182505. Washington DC: NASA, 1988.
- 23 NASA. Astronautics and Aeronautics, 1970: Chronology on Science, Technology, and Policy, NASA SP-4015. Washington DC: NASA, 1972.
- 24 Hall E C. Reliability history of the Apollo Guidance Computer, NASA-CR-140340. Washington DC: NASA, 1972.
- 25 Ginzburg E, Kuhn J W, Schnee J, et al. Economic Impact of Large Public Programs: The NASA Experience, NASA-CR-147952. Salt Lake City: Olympus Publishing Company, 1976.
- 26 Andrew C. A Man on the Moon: The Voyages of the Apollo Astronauts. London: Penguin Books, 2007.
- 27 Kenneth S K. Design Principles Stressing Simplicity. What Made Apollo a Success. Washington DC: Scientific and Technical Information Office, NASA. 1971: 15-20.
- 28 Hall R C. Lunar Impact: A History of Project Ranger, NASA SP-4210. Washington DC: Scientific and Technical Information Office of NASA, 1977: 162-163.
- 29 George M L. Introduction. What Made Apollo a Success. Washington DC: Scientific and Technical Information Office, NASA, 1971: 1-14.
- 30 Harvey S. The Polaris Systems Development. Cambridge: Harvard University Press, 1972: 94-130.
- 31 Eligar S. Impacts of the Apollo Program on NASA, the Space Community, and Society// Steven J D. Historical Studies in the Societal Impact of Spaceflight. Washington DC: NASA History Program Office, 2015: 505.

- 32 Walter A M. The Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age. New York: Basic Books, 1985.
- 33 Marcia D. More Delays for NASA's Astronaut Moonshots, With Crew Landing off Until 2026. (2024-01-10) [2024-01-21]. <https://apnews.com/article/nasa-moon-landings-artemis-delay-23e425d490c0c9e65ac774ec2e00f090>.
- 34 Lianto B, Dachyar M, Tresna Priyana S. Continuous innovation: A literature Review and Future perspective. International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, 2018, 8(3): 771-779.
- 35 Pielke R. Lessons from 50 years of science advice to the US president//Weingart P, Wagner G G. Wissenschaftliche Politikberatung im Praxistest. Weilerswist: Velbrück Wissenschaft, 2015: 51-65.

Scientific and technological innovation of Apollo Program and its gain and loss

SUN Lie^{1*} LI Chengzhi²

(1 Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Institute for Advanced Studies in Humanities and Social Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract The seminal accomplishment of the Apollo Program, which succeeded in preparing and landing the first men on the Moon, was the execution of an unparalleled project, etching an indelible mark on scientific and technological annals. The program's chain of pioneering feats stands as a monument to mankind's scientific and technological progress. Scientifically, the project endeavour yielded an abundance of findings, markedly enhancing the celestial understanding of the moon's composition and morphology. Technologically, it served as a catalyst for the advancement of integrated circuits and the burgeoning high-tech sector. Engineeringly, NASA distilled a corpus of methodological and managerial expertise tailored to big science projects. When juxtaposed against the contemporary US lunar exploration initiative, the Apollo Program's avant-garde approach appears to be somewhat at odds with the trajectory of its successor endeavors. Judging from the implementation of the new lunar exploration plan of the US, it is not possible to form an innovative and leading advantage with the strength of the whole country at a stage. The capacity for sustainable innovation remains a pivotal factor in the competition for seizing scientific and technological heights.

Keywords Apollo Program, scientific and technological innovation, big science project, continuous innovation, research & military industrial complex

孙烈 中国科学院自然科学史研究所研究员。主要研究领域: 现当代科学技术史、高技术发展战略。
E-mail: sunlie@ihns.ac.cn

SUN Lie Professor of Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on history of modern and contemporary science and technology, and high tech development strategy. E-mail: sunlie@ihns.ac.cn

■责任编辑: 文彦杰

*Corresponding author