

阿波罗计划的技术范式及其影响分析

An Analysis of the Technological Paradigm of the Project Apollo and Its Impacts

马得林 /MA Delin 颜心怡 /YAN Xinyi 刘建立 /LIU Jianli

(西安电子科技大学人文学院, 陕西西安, 710126)
(College of Humanities, Xidian University, Xi'an, Shaanxi, 710126)

摘要: 阿波罗计划是在冷战背景下美国政府为赢得太空竞赛而由国家主导的、通过巨量资源投入、采取集中式管理、推动太空技术极限创新的大科学模式。该模式使得美国短时间内在导航制导、通信、材料、生命支持、计算机等航天领域取得了多项技术突破,成为航天大国。在阿波罗计划执行过程中,为解决人类首次登月面临的极端复杂技术与安全风险问题,美国航空航天局(NASA)在项目管理上采取系统思维与系统设计方式,如目标导向思维、模块化与冗余设计、快速迭代与风险设计等,使得阿波罗计划得以安全有效实施。历经60余年科技进步,在当代深空探索中,分布式协作和敏捷式开发正逐步成为技术发展主导模式,但阿波罗计划遗留的勇于突破技术边界、激发公众太空热情、拓展认知边疆等精神内核仍熠熠生辉。

关键词: 技术范式 系统思维 分布式协作 敏捷式开发

Abstract: The Project Apollo was a government-led initiative by the United States to win the space race against the backdrop of the Cold War. It features in a big science model involving promotion of extreme innovation in space technology by means of massive resource investment and centralized management. This model enabled the United States to achieve significant technological breakthroughs in areas such as navigation guidance, communication, materials, life support, and computing within a short period, establishing it as a space superpower. During the execution of the Project Apollo, to address the extreme complexity of technology and safety risks posed by the first human landing on the moon, NASA (National Aeronautics and Space Administration) adopted an approach of system thinking and system design in project management, including goal-oriented thinking, modular and redundant design, rapid iteration, and risk design, which allowed the Project Apollo to be implemented safely and effectively. After more than 60 years of technological advancement, distributed collaboration and agile development are gradually becoming the dominant models in contemporary deep space exploration. However, the core spirit of the Project Apollo, which includes the courage to break through technological boundaries, inspire public enthusiasm for space, and broaden cognitive frontiers, still shines brightly.

Key Words: Technical paradigm; System thinking; Distributed collaboration; Agile development

中图分类号: F204; N031 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2025.12.002 CSTR: 32281.14.jdn.2025.12.002

基金项目: 西安电子科技大学2025年度学科交叉拓展特支计划专项资助“生成式人工智能(GenAI)的伦理风险与治理路径研究”(项目编号: TZJHS202501)。

收稿日期: 2025年7月10日

作者简介: 马得林(1975-)男, 青海西宁人, 西安电子科技大学人文学院教授, 研究方向为科技哲学、科技史。Email: mdl_xidian@163.com

颜心怡(2000-)女, 陕西西安人, 西安电子科技大学人文学院硕士研究生, 研究方向为科技哲学。Email: 19891680816@126.com

刘建立(1979-)男, 河南商丘人, 西安中甲电气有限公司总工程师, 西安电子科技大学兼职导师, 研究方向为航空航天领域电气、材料等。Email: 254755697@qq.com

引言

1961年5月25日,美国总统肯尼迪宣布启动“阿波罗计划”,开展对距离地球最近的天体——月球进行实地考察。美国将其登月计划命名为“阿波罗计划”,寓意对太空探索的勇气和决心。为实现此目标,历经多次从无人到有人分阶段技术验证,在1969年7月20日,阿波罗11号终于在月球静海成功着陆,实现了载人登月目标。其指令长尼尔·奥尔登·阿姆斯特朗(Neil Alden Armstrong)和登月舱驾驶员埃德温·奥尔德林(Edwin E. Aldrin)先后踏上了月球松软的土壤,迈克尔·柯林斯(Michael Collins)驾驶哥伦比亚号指令舱环绕月球飞行。^[1]阿姆斯特朗在踏上月球后说出那句广为人知的话:这是我的一小步,人类的一大步(That's one small step for man, one giant leap for mankind)。阿波罗11号在登月成功后进行了多项科学探测工作,如安装光学相机、光谱仪和激光高度计等科学仪器,并对月球进行了相关探测。^[2]宇航员还考察了月球地质,收集了月球岩石和表岩屑的样本。表岩屑就相当于月球的土壤,是月球的岩石被微陨石撞击后产生的碎片,覆盖在月球表面上。^[3]据统计,整个阿波罗计划总计带回了382千克样本,这些月球岩石样品,奠定了现有的月球科学框架,形成了对月球演化历史乃至地球早期演化历史的科学认知。^[4]

阿波罗计划是人类航天史上具有划时代意义的一项伟大成就,自1961年5月启动至1972年12月终止,美国共实施了7次载人登月任务,除“阿波罗13号”因发生故障中途返航,其余6次均成功,共有12名宇航员成功登月。^[5]该计划在实施过程中总耗资255亿美元,相当于当时美国GDP的0.57%,联邦预算的4.5%,科研经费的20%。先后集结了2万多家企业、200多所大学、80多家科研机构和30多万科研人员,创造了人类航天史上重要里程碑。^[6]阿波罗计划终止半个世纪后,其多项核心技术(如土星五号火箭)已无法直接沿用,其工业基础(如

生产链、人才团队)在冷战结束后也已逐渐流失。同时,随着航天技术的不断迭代和新技术开发模式的迅速涌现,当今时代的深空探测已与阿波罗计划时代有了很大不同。但阿波罗计划的技术范式与精神遗产仍对今天的深空探索有着深远影响。本文基于已有文献基础,对阿波罗计划的技术范式及其影响进行分析和阐释。

一、阿波罗计划的技术与工程成就

阿波罗计划诞生于二战后美苏两强争霸时期,当时双方试图全力争夺太空技术优先权。1957年10月4日,苏联先于美国成功发射了第一颗人造卫星“斯普特尼克1号”,标志着人类正式进入太空时代。时隔不久,1961年4月12日,苏联又成功将宇航员尤里·加加林(Юрий Алексеевич Гагарин)送入了太空,成为人类首位进入太空的宇航员。苏联在太空领域的成功迫使美国以更激进的目标进行回应,这就有了阿波罗登月计划。可以说阿波罗计划是在冷战背景下美国为“赢得太空竞赛”目标而展开的大科学工程,旨在向苏联及全球展示美国科技能力与国家实力。历史地看,阿波罗计划是冷战时期美国在太空竞赛中取得胜利的标志性事件,其在技术与工程领域取得了一系列划时代成果,深刻影响了人类后续航天计划。

阿波罗计划之所以诞生冷战时期的技术与工程奇观,核心原因在于美国“举国体制”下的集中式投入,它集聚了航空航天领域相关的研发及生产资源,兼顾了集中管理和矩阵管理(扁平化管理)的优势,最终催生了诸如土星五号火箭这样的工程奇迹。土星五号高达110米,起飞总质量达3038吨,总推力达3400吨,近地轨道运载能力约140吨。^[7]其三级的设计实现了火箭的高效能量传递,其中第一级火箭采用的是5台巨型F-1液氧/煤油推进剂发动机,其单台推力达677吨。1965年4月16日,在阿拉巴马州亨茨维尔进行的首次静态测试取得成功,让研究人员看到了实现登月目标的技术可能性,因为该型发动机成功解决了当时大推力

发动机燃烧不稳定的世界性难题。^[8]土星五号的二、三级火箭采用J-2发动机,是首个实现燃气发生器循环的氢氧发动机,为后来的航天飞机主发动机奠定了基础。^[9]在阿波罗计划17次任务中(包括无人测试),土星五号保持了近乎完美的发射成功率,奠定了超重型火箭设计标杆。

阿波罗计划取得成功的关键还在于一些航天领域的重大技术突破,包括:登月方案、火箭与航天器系统、导航和制导系统、通信系统、生命支持系统、材料和热防护系统等。登月方案是阿波罗计划中关键性难题,它涉及的问题很多很复杂,大问题主要有三个:火箭的运载能力、登月过程的安全性以及月球表面的承受力。当时工程师们提出的登月方案有四个:直接起飞法(Direct Ascent)、地球轨道交会法(Earth Orbit Rendezvous, EOR)、月球表面交会法(Lunar Surface Rendezvous, LSR)、月球轨道交会法(Lunar Orbit Rendezvous, LOR)。几种方案各有优点,缺点也很突出,为此科学家和工程师们曾进行了激烈的辩论。LOR方案由兰利中心(Langley Research Center)的工程师约翰·霍博尔特(John C. Houbolt)提出,初期并不被看好,但经过激烈的争论和多轮研究论证后,科学家们认为该方案是最优选择,因其在同样的运载火箭条件下,可以把更大的登月舱送到月球表面。^[10]该方案建议一次性发射航天器前往月球,待航天器进入月球轨道后将一个小型着陆器发射到月球表面,在完成登月任务后,着陆器的上升级返回月球轨道并与指挥舱交会对接后返回地球。综合看,月球交会对接方案是几种方案中成本最低、技术上最简单的方法,但其风险也很大,因为交会对接将是在月球轨道而不是地球轨道上进行的,没有出错的余地,否则宇航员将无法返回地球。^[11]

为确保登月任务的安全经济实施,航天器采用了模块化设计,由指挥舱、服务舱和登月舱组成飞船的总体布局。指挥舱是全飞船的控制中心,也是宇航员在飞行过程中生活和工作的座舱。服务舱用于轨道转移和变轨机动,其中包含支持指令舱及宇航员所需的子系统。其

前端与指挥舱对接,后端有推进系统主发动机喷管。^[12]登月舱由下降级和上升级组成,其中下降级由着陆发动机、着陆架和四个仪器舱组成;而上升级则是登月舱主体,宇航员完成月面活动后驾驶上升级返回环月轨道与指挥舱会合。^[13]登月舱的模块化设计首创了可分离设计思路,解决了航天器在月球表面着陆与起飞难题,并能适应月球的低重力环境,成为载人航天器设计的重要参考模式。在阿波罗10号实施的载人实验中,登月舱和指挥服务舱的各个系统已具备了执行载人登月任务实际条件。^[14]

导航和制导系统可以说是阿波罗计划成功的关键技术,它能使阿波罗飞船准确飞向月球并成功着陆。为达到此目标,工程师首先要完成导航计算机设备(Apollo Guidance Computer, AGC)的小型化,这样不但能减轻航天器载荷重量,还能实现AGC在执行任务过程中进行实时计算,其最终设计重量只有14公斤,这样就能和航天器的命令模块和月球模块安装在一起,大大压缩了所占用空间。此外,AGC模块还控制着航天器的许多物理部件,可以与航天器内的150个不同设备进行通信,这是一项极其复杂的任务。^[15]导航和制导系统的发明使得宇航员可以选择不同的操作和控制方式,自动化设备与适应性极强的传感器协同运行,使其复杂高速的测量和数据处理能力与人类判断力之间取得了平衡。^[16]全新研发的惯导导航系统(Inertial Navigation System, INS),可以在飞船飞行过程中结合陀螺仪和加速度计,为航天器提供高精度姿态控制,成为现代GPS和自动驾驶技术的先驱。在深空通信和遥测技术方面,阿波罗航天器统一采用S波段(USB)通信系统,实现了地球与月球之间的高带宽实时通信,支持语音、图像和科学数据的传输,成为现代卫星通信的雏形。^[7]

生命支持系统方面,阿波罗计划也采用了全新设计。科学家研发了可以实现氧气再生、二氧化碳过滤、水循环和温度控制的航天器生命支持系统(Life Support System, LSS)。该系统是专为维持航天员在太空飞行过程中实现生存和工作所必需的一套复杂系统,由六个子系

统组成,包括供氧子系统、加压服回路子系统、水管理子系统、温度控制子系统、废物管理子系统和着陆后通风子系统。^[18]这一系统是一套可实现生命保障、热控、水循环、废物处理于一体的高冗余、零重力适应、资源闭环的集成系统,在极端空间环境下可14天无故障运行,为后续所有载人航天器环境控制奠定了工程与科学基础。^[19]宇航服和航天器的设计也考虑了宇航员抗辐射和微重力适应问题,宇航服外部采用了1960年代初期研发的多层绝缘材料,在月面 $\pm 250^{\circ}\text{F}/-140^{\circ}\text{F}$ 的极端温度交变环境中仍能阻止外部热量传导。然而1967年阿波罗1号的火灾事件,使NASA对宇航服的材料更加重视。在火灾调查后指出必须严格限制和控制指示舱中可燃材料的数量和位置。在科研团队共同努力下,聚四氟乙烯涂层玻璃纤维布等防火材料以及其他阻燃宇航服材料得以开发,^[20]并成功应用于阿波罗计划。美国宇航局将其命名为A-7L,^[21]这一版本的航天服是在阿波罗7号到14号任务期间、发射和重返大气层以及太空行走期间所穿的套装版本。同时,为抵消便携式生命支持系统重量增长,设计团队将紧急氧源外壳改为“玻纤+铝蜂窝”低密度夹芯结构,压力囊内层改用芳纶涂层织物,氧指数大于30%,点燃温度提升 120°C ;同时氯丁橡胶降低可挥发烃含量,减少舱内 CO_2 清除剂中毒风险,既维持气密性,又降低纯氧环境下的可燃性,同时限制有毒气体逸出。这一设计实现了刚度-质量比最优,在重量、体积、热控、安全之间取得平衡,为后续深空探测提供了经验。此后,设计团队不断改进防护服,以提高机动性、能见度和材料耐用性。阿波罗15号至17号上的机组人员穿着更高级版本的套装,命名为A-7LB。^[22]阿波罗航天服在防护、生命支持和灵活性平衡上的设计奠定了现代航天服的基石,其核心思路与功能模块化原则至今仍然在沿用。在材料和热防护方面,阿波罗计划也取得了巨大进展,返回舱在返回大气层时,其表面采用烧蚀材料(俗称隔热瓦)如酚醛浸渍碳,通过高温下的材料汽化吸收热量,奠定了坚实的材料科学基础,保护了航天器和宇航员再入

大气层时安全。^[23]此外,节约载荷重量也是航天器设计的核心目标之一,阿波罗航天器广泛采用钛合金、铝合金和复合材料,可以在大幅度减轻结构重量的同时保证航天器的强度,推动了航空航天材料科学的发展。

二、阿波罗计划的系统思维和设计方法

20世纪40年代,战争需求推动了科技新发展。出现了系统论、控制论、信息论等“老三论”,极大影响了科学技术发展进路,在通信工程、计算机科学、密码学、生物学、医学等科学领域产生了颠覆式影响;其形成的一般系统思维,具有整体性、多维度、过程性、层级化等特点,逐步成为科学和工程技术领域的主导方法。阿波罗计划的决策层将系统科学与系统思维应用到航天器设计、火箭工程、计算机科学、材料学等领域,开创了用系统思维和方法解决复杂工程问题的范例。在其目标设定、系统分解、协同整合、动态管理等方面,是系统思维应用与实践的主要领域。^[24]1961年美国提出在“10年内登月”,预示着模糊目标变为了可量化目标,为此必须通过逆向技术拆解,从月球表面作业-轨道对接-地球发射等目标来倒推技术需求。阿波罗计划的成功充分显示了系统思维的作用与威力。时任美国航空航天局局长的詹姆斯·韦伯(James E. Webb)曾总结说:在十年登月计划中系统工程和系统管理得到了高度发展,在这个复杂的系统中创造了高效率、高可靠性的管理体系、新的系统试验方法以及大规模的优化管理理论和限制条件分析等概念和方法。^[25]系统思维的成功应用,使得阿波罗计划实现了将40万人团队、10万多个零件转化为可计算、可控制、可演进的有机整体。

航天器系统设计是在任务要求分析的基础上,协调和综合各系统的需求和约束,采用系统工程方法,有效组织航天器平台和有效载荷,协调开展系统总体设计,以形成满足要求的、优化的系统。^[26]通过学科高度整合而形成的“任务控制中心”的系统思维模式,至今仍是大型工程项目的标准。系统思维的核心在于

通过多维度、分层次的协作，将庞大目标拆解为可执行的模块，同时保持整体目标的统一性。比如在土星五号运载火箭架构设计需要将仪器装置、登月舱和登月舱适配器、勤务舱、指令舱和发射逃逸系统进行有效整合，为此NASA采用了一种非常关键的工具，即任务分解结构，将艰巨的任务分解为更小的任务，任务分解的一侧是硬件结构，另一侧则包括项目控制、系统工程和集成、可靠性和质量保证的系统测试。^[27]在整个阿波罗计划实施过程中，基于系统思维的管理模型和方法不断被开发，有效地满足了该计划艰巨的工程、技术和组织的集成需求。^[28]特别是在目标导向的项目管理方法、跨学科协作模式、模块化设计、可靠性与冗余设计、风险管理设计等领域得到了广泛应用。

在项目管理模式上，阿波罗计划采用协同整合方法，打破“烟囱效应”。^[29]自始至终采用整体目标导向的管理方法。这种方法坚持“以终为始”的顶层设计，明确阿波罗计划的核心任务是“登月并安全返回”这一终极目标。因此，登月计划的所有子系统（火箭、导航、生命维持等）均围绕该目标进行设计，以避免局部优化而整体失效。例如土星五号火箭，分三级设计，每一级火箭可独立运行，但要通过统一接口实现级间协同，确保每一级完成任务后平滑脱离，最终实现地月转移，并在登月成功后，登月舱升级在月球轨道与指挥舱完成交会对接等复杂任务后返回地球。^[30]

阿波罗计划是继曼哈顿计划（Manhattan Project）后的典型大科学工程，涉及的学科与专业庞杂，参与研制的科研机构众多，大卫·明德尔（David Mindell）曾说阿波罗计划在1960年代一度消耗了美国60%的集成电路产量，这对一项技术来说是一个巨大的推动。^[31]这就需要决策层不但要做好研究目标的总体规划，而且要实现跨行业、跨学科高效协作，打破行业、学科和专业壁垒，才能发挥好不同科研机构和学科群体的比较优势，做好目标导向下的协作工作。为此，阿波罗计划的决策层决定利用社会支撑系统，动员数十万科研人员与产业工人，形成“国家意志驱动+市场化竞争”的混合模

式，^[32]为突破各自为阵的行业、学科、技术壁垒，NASA需要整合300余家承包商（如波音、北美航空等），在它们之间通过统一标准（如MIT制定的指令舱计算机规范）来实现技术兼容。通过工作分解结构，明确各自责任。比如指令舱的承包商为北美航空公司，由NASA的约翰逊中心负责监督；登月舱的承包商为格鲁曼公司，由NASA的兰利研究中心负责监督。在跨学科协作方面，NASA决定采用系统集成设计，将航天器工程、材料科学、计算机、医学等领域专家整合为“铁三角”团队（如MIT仪器室与波音公司的协作），在不同科研机构与团队之间通过频繁跨领域沟通来解决复杂问题。这些突破传统行业壁垒和学科体系的做法，大大提升了各科研主体的主动力和协作性，打破了行业和学科壁垒，为阿波罗计划的顺利实施奠定了坚实的科研协作模式基础。

为降低成本、提高可靠性，阿波罗计划的指令舱、服务舱、登月舱均采用独立模块化设计，允许并行开发和故障隔离，提高了系统的灵活性和可靠性。^[33]每个模块物理独立、功能独立，采用标准的机械、电、热及数据接口对各模块进行连接，实现航天器的整体功能，从而满足各种多任务航天器设计要求。^[34]与此同时，在轨服务技术也得到了较快发展，即对空间飞行器实施在轨装配、修理和维护等操作。^[35]此外，还采用分而治之的策略，将登月任务拆解为“发射→奔月→着陆→返回”等阶段，每个阶段对应独立子系统（如登月舱的下降级与上升级分离设计）。

阿波罗计划非常重视可靠性与冗余设计，这种设计是保证宇航员安全的重中之重。可靠性工程是通过系统化方法确保产品或系统在规定条件、时间内完成预定功能的学科，涵盖设计、试验、管理全生命周期。^[36]如阿波罗计划通过振动测试、真空模拟和热循环试验，验证设备在极端条件下的稳定性。冗余设计是可靠性工程的核心策略之一，通过增加备份组件或功能，确保单一故障不会导致系统整体失效。为此阿波罗计划的关键系统都采用了冗余设计（如双计算机、三套导航系统），确保单一故障

不会导致任务失败。关键系统(如阿波罗导航计算机)还采用三模冗余,通过多数表决机制容错,体现“局部脆弱性换取整体鲁棒性”的系统思维。

作为人类首次登月探索活动,阿波罗计划的风险之高毋庸置疑,但其风险管理实践至今仍被视为航天领域的典范。首先,NASA在风险管理方面采取了预见性思维与预案设计,尽量防止事故发生。但若确有事故发生,则采用故障模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA),预先模拟数百种故障场景(如发动机失效、电脑故障、生命维持系统故障等),来制定应对事故和危机的标准化应急预案,比如在拯救阿波罗8号由于宇航员误操作而将导致的灾难和阿波罗11号在月球着陆之际的电脑系统崩溃时,以玛格丽特·汉密尔顿(Margaret Brainard Hamilton)这位代码专家为首的软件工程师们的程序冗余设计起到了至关重要作用。^[37]

NASA还通过风险管理和风险设计,构建了覆盖全周期的风险防控体系。这种风险管理的重要性的确在实际发生危机后的救援工作中体现地淋漓尽致。比如阿波罗13号在成功发射后飞往月球的第三天深夜,发生了氧气罐爆炸事故后,地面团队快速重构任务目标,利用登月舱作为“救生舱”,通过重新计算轨道、关闭非必要系统等快速迭代方案实现求生,最终有效化解人为制造的危机(氧气罐生产厂家没有严格执行生产标准),展现了极强地系统弹性,成功营救三位宇航员返回地球,验证了复杂系统管理的黄金法则:冗余安全性和风险设计。

三、阿波罗技术范式与大科学模式的演进

阿波罗计划是20世纪大科学工程的巅峰之作,它远不止是美国登月计划的工程成就,更是一种被后世奉为圭臬的系统工程管理、技术创新和组织协同的方法论和哲学思想。笔者认为“阿波罗技术范式”的核心可以理解为:为了达成一个极其宏大、极其复杂、极其困难的

战略目标,通过国家层面的顶层设计和资源动员,建立起一套在极短时间内催生出颠覆性技术集群和创新突破的高度集中、跨学科、严密的系统工程管理体系。阿波罗计划不但形成了一个技术范式,还灌输了一种特定的信念体系。这种信念体系包括政治伦理、技术伦理和探索伦理。正是在这套信念体系中,阿波罗设定了一个衡量人类成就的新标准——如果人类能够让一个人登上月球,那么他们就可以在技术和社会上做其他一切。^[38]拜尔利(Radford Byerly)与布伦纳(Ronald D. Brunner)等学者总结了“阿波罗范式”的三个特征:a. 规模庞大、成本高昂;b. 按照一个集中的核心计划进行预先规划,并与其它项目整合到一起,任何薄弱链接出现失误都会对其造成危害;c. 依赖于长期、稳定、集中的政治支持。^[39]

为保证投入的有效性,阿波罗计划在管理方法上采用集中管理模式,由NASA总部统筹决策,强调指令统一与效率优先,并与分系统承包商形成四级管理体系。这种集中管理、投入巨大的模式显然对美国政府的财政能力提出了极大的挑战,加上阿波罗计划存在的其它问题,在冷战结束后就失去了项目延续下去的内在动力。^[40]可见,尽管二战后的美国经济实力雄厚,但这种持续高投入的科研模式也难以以为继。

阿波罗计划终止50多年来,太空探索模式在总结其弊端中不断演进,逐步经历了从集中封闭到多元协同、从国家主导到多元参与、从注重政治效果转向追求综合效益,具体表现为以下三个方面:

其一,在技术模式方面,从集中封闭模式走向协同分布模式。在阿波罗登月任务之后,自1972年,美国开始开发一种全新的飞行器——航天飞机(Space Shuttle)。在1973年使用最后一架阿波罗时代的飞行器发射了实验空间站天空实验室(Skylab),并于1975年参加了苏美太空会合,即阿波罗-联盟号任务,这一象征冷战缓和背景下的航天合作尝试。^[41]1969年,一个太空任务组向尼克松总统推荐了一项太空计划,以跟踪登月任务。该计划包

括一个永久空间站、一艘可重复使用的航天飞机以及最终的火星任务。但由于预算压力越来越大,最终只有航天飞机赢得了青睐和资金支持。整个轨道航天飞机机队最终包括五架可重复使用的飞行器。这五架轨道飞行器——哥伦比亚号、挑战者号、发现号、亚特兰蒂斯号和奋进号,在1981年至2011年间执行了135次任务,对国际空间站的建设至关重要。^[42]而始于1993年的国际空间站,则增加到16国联合共同参与建设,是有史以来耗时最长、规模最大且涉及国家最多的空间国际合作项目。该项目可开展大规模、多学科基础与应用研究的空间实验室,各成员国之间做到了分工明确且资源共享。21世纪以来,开放合作的模式成为了太空探索的主流模式。

其二,在主导力量方面,从单一政府主导转向多元商业主体参与。商业力量的崛起和开放科学运动是21世纪大科学范式革命的重要变革力量。在航天领域,随着商业航天的崛起,彻底改变了航天领域的原有发展模式。比如美国SpaceX、蓝源等商业航天公司的发展壮大,使得商业公司在载人深空探索中发挥的作用将越来越重要。NASA在2019年2月正式发布公告,号召私人企业参与到载人登月技术开发中来,包括参与登月系统登陆舱、太空加油系统和飞船的初步研究和开发等,此外NASA还公布了2028年在私营企业协助下实现重返月球计划的路线图。^[43]这些市场化运作方式在阿波罗时代是被严格限制的,但在如今的深空探测方面正在重塑太空探索的任务模式及成本结构。

其三,技术目标方面,从注重政治效果转向追求综合效益。当代大科学工程支持公私混合治理。比如NASA就允许诸如SpaceX等私营企业的商业航天任务中嵌入国家战略,这种公私协作模式不仅分摊风险,更催生技术创新竞赛。自2011年美国航天飞机计划被取消以来,私营航天企业取得了很大的技术和经济进步,特别是通过设计和制造更便宜且可重复使用的航天器,但私营航天工业仍然依赖美国政府。这种依赖性——在载人航天方面尤其明显——取决于产生资金的公共合同、对政府发

射场的依赖以及支持和许可私人太空发射的政府政策。^[44]此外,当代深空任务还非常注重投入与产出比分析,强调深空探索的长期效益和经济社会等综合效益。如国际空间站,资金来源实现了多元化(政府拨款、私营企业合作),历时30余年分阶段建设,注重项目可持续性,提倡分担成本,并提升技术迭代效率。

冷战结束后,很多新兴国家也开始参与国际合作的深空探索项目,比如中国的深空探索重大专项任务主张积极开展国际合作,与各国优势互补,逐渐推动深空探索国际合作向更深、更广发展。^[45]同时,中国还积极开展火星数据交换与国际合作,针对NASA提出的火星探测器轨道星历数据交换请求开展数据交换,与欧空局(European Space Agency, ESA)火星快车开展在轨中继通信对接试验,并验证了相关设计标准与国外设备的兼容性,展现了“自主创新+国际合作”模式在深空探测中的可行性。^[46]可见,相较于阿波罗计划,当代深空探索大科学项目在时代背景与实现路径方面存在显著差异,科研模式已经发生了很大变化,呈现出开放共享、多目标协同、国际合作的特征,其核心是通过全球协作应对太空探索的复杂技术挑战,而非单一国家的技术竞赛。

四、当代深空技术模式对阿波罗模式的重构

阿波罗计划克服了复杂技术难题并成功实现人类首次载人登月,无疑具有里程碑意义,但也暴露出因其投入巨大成本高昂而难以为继的困境。因此,在阿波罗17号之后,美国政府宣布暂停了该计划。但进入21世纪以来,随着财力改善和技术进步,载人登月再次成为了太空探索的热点,美、欧、印、日等国家相继公布了深空探测路径与战略规划蓝图。2020年美国与澳、加、日、英等7个国家签订了旨在重返月球,并为登陆火星做铺垫的阿尔忒弥斯计划(Artemis Project),截止2025年8月,该计划的协定签署国家已达33个。欧洲航天局的ExoMars计划则与阿尔忒弥斯协议形成了技术

互补,旨在通过轨道器、着陆器和火星车系统寻找火星生物标记,并研究火星环境与演化历史。欧洲空间局提出的月球村计划则希望通过建立国际化的月球探测平台,以实现科学研究、技术验证等多重目标。^[47]

深空探测战略路径规划作为指导探测任务开展的顶层设计,已成为新一轮国际深空探测的重点。但为降低投入成本和技术风险,当代深空探索的技术模式逐渐从阿波罗计划集中式、密闭式模式转向分布式协作(Collaborative Development)和敏捷式开发(Agile Development)模式。^[48]它们打破了自阿波罗计划开始在航天领域强调“政府主导、封闭研发”的方式,转而走向开放、共享、多主体协同的创新生态。不仅加速了技术进步,还重构了深空探索的组织模式、任务执行方式及国际合作框架。这些新模式因其高效节约,在国际太空项目开发中,逐步取代了阿波罗时代的集中式任务规划。^[49]

随着人工智能技术的广泛应用,在深空探测领域,人机协同模式也发生了颠覆式变化,深空探测任务的主体和执行方式已与传统方式根本不同,执行太空探测任务的主体很可能是具有自主运行能力的人工智能。搭载人工智能技术的机器人被部署在太空中,用于接收、处理数据或采取特定行动。^[50]比如毅力号火星车,通过其搭载的AI系统,使得火星探测任务实现了从“精确规划”到“实时适应”,火星车在探测过程中可自主选择科考目标并调整行进路线,做到任务动态处理,而无需在原地等待地球指令(火地通信延迟达20分钟),这显然与阿波罗计划“每一步都需地面确认”的模式完全不同。^[51]其搭载的火星制氧原位资源利用实验载荷实现了人类首次在地外天体原位资源利用在轨验证。^[52]而在阿波罗计划时代,一旦任务被确认,则是发射即锁定,技术和任务都无法更改。

总而言之,当代深空探索的新技术和新模式,本质上是用网络化思维替代金字塔结构,用技术的持续进化与迭代取代孤注一掷式的一次性突破。这种变革形成了一种新的技术思维,

即从传统技术设计追求“完美设计”转向当代“容错迭代”的设计思维,随着技术开发模式的转变,航天任务的管理与组织模式也从“层级控制”转向了“自组织网络”,在未来,深空探测或将演变为类似互联网的“开放协议+分布式节点”体系,这将对阿波罗计划技术范式的颠覆与重构。

结 语

虽然阿波罗计划早已终止,但其集中力量突破技术边界、激发公众太空热情、拓展认知边疆等精神内核仍在不断延续。经过60多年的技术积累与变革,当代深空探测路径已演变为多元协同的创新生态,推动人类太空探索能力不断提升。在未来某一天,当新型航天器登陆火星时,我们看到的不仅是火箭技术和宇宙飞船的代际跨越,更是人类探索宇宙的新技术、新模式的不断涌现。在此过程中,阿波罗技术范式的遗产不是被简单复制,而是在深空探测新维度中完成创造性转化,不断为人类走向行星文明奠基。

[参考文献]

- [1] 庞之浩. 改变历史的“阿波罗”载人登月工程[J]. 国际太空, 2019, (7): 6-10.
- [2] 孙泽洲. 深空探测技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017, 4-11.
- [3] 瞿立建. 阿波罗计划的科学遗产[J]. 世界科学, 2019, (8): 47-51.
- [4] McCubbin, F. M., Herd, C. D., Yada, T., et al. 'Advanced Curation of Astromaterials for Planetary Science'[J]. *Space Science Reviews*, 2019, 215(8): 1-81.
- [5] 杨瑛. 时隔50年,美国为何想重返月球?[N]. 解放日报, 2022-08-26(004).
- [6] 徐峰. 阿波罗计划:科技计划组织的典范[N]. 科技日报, 2015-07-24(08).
- [7] 曾宪奎. 我国构建关键核心技术攻关新型举国体制研究[J]. 湖北社会科学, 2020, (3): 26-33.
- [8] Launius, R. D. 'Apollo: A Retrospective Analysis'[J]. *National Aeronautics and Space Administration*, 2004, (7): 14.
- [9] 张雪松. 从土星5号到SLS——美国大型火箭发动机的

- 演化[J]. 太空探索, 2018, (2): 36-39.
- [10] 李成智. 阿波罗登月计划全史[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019, 202.
- [11] Hansen, J. R. *Enchanted Rendezvous: John C. Houbolt and the Genesis of the Lunar-Orbit Rendezvous Concept*[M]. Washington, D.C.: NASA History Office, 1995, 2.
- [12] Williamson, M. 'Aiming for the Moon: The Engineering Challenge of Apollo'[J]. *Engineering Science and Education Journal*, 2002, 11(5): 164-172.
- [13] 陈金宝、陈传志等. 载人登月舱设计及若干关键技术研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(2): 125-136.
- [14] 理查德·奥尔洛夫. 阿波罗计划——权威原始资料[M]. 孙威译, 北京: 清华大学出版社, 2020, 278.
- [15] 乔琦. 登月计划中的计算机工作[J]. 世界科学, 2019, (7): 25-30.
- [16] Hoag, D. G. 'Apollo Guidance and Navigation—A Problem in Man and Machine Integration'[EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/downloads>. 1964-05-01.
- [17] 阿波罗统一波段通信技术第一卷(功能)[J]. 无线电译文, 1972, (2): 1-31.
- [18] Samonski, F. H., Elton, M. 'Tucker Manned Spacecraft Center. Apollo Experience Report command and Service Module environmental Control System'[EB/OL]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/downloads>. 1972-03-01.
- [19] 埃里克·西德豪斯. 载人航天生命保障系统[M]. 郭双生译, 北京: 北京理工大学出版社, 2024, 113.
- [20] Chullen, C. 'U.S. Spacesuit Legacy: Maintaining It for the Future'[A], *The 43rd International Conference on Environmental Systems*[C], Vail, CO, 2013, 17.
- [21] Uri, J. '50 Years Ago: Certifying Apollo Spacesuits'[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/history/50-years-ago-certifying-apollo-spacesuits/>. 2018-10-1.
- [22] Thomas, K. S. 'The Apollo Portable Life Support System'[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/static/history/alsj/ALSJ-FlightPLSS.pdf>.
- [23] 宗合. 划时代的阿波罗计划[J]. 太空探索, 2018, (2): 32-35.
- [24] Francis, T. 'Hoban William M. Lawbaugh. Readings in Systems Engineering'[J]. *NASA Scientific and Technical Information Program*, 1993, (1): 5.
- [25] 张义芳. 美国阿波罗计划组织管理经验及对我国的启示[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(6): 1046-1050.
- [26] 张庆君、刘杰. 航天器系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018, 29.
- [27] 安东尼·杨. 土星V号运载火箭F-1发动机——推举阿波罗创造历史[M]. 陈祖奎等译, 北京: 中国宇航出版社, 2020, 198.
- [28] Sadeh, E. 'Societal Impacts of the Apollo Program'[EB/OL]. http://www.astrosciology.com/Liarbry/PDF/Impact_Sadeh.pdf. 2008.
- [29] Launius, R. D. *Apollo: A Retrospective Analysis*[M]. Washington, D.C.: NASA History Office, 2004, 10.
- [30] 刘竹生、张菽. 国外重型运载火箭启示[J]. 中国航天, 2015, (1): 22-27.
- [31] Hollingham, R. 'Apollo: How Moon Missions Changed the Modern World'[EB/OL]. <https://www.bbc.co.uk/future/article/20230516-apollo-how-moon-missions-changed-the-modern-world>. 2023-05-07.
- [32] Weinzierl, M. 'Space, The Final Economic Frontier'[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2018, 32(2): 173-192.
- [33] NASA. 'What Made Apollo a Success?'[EB/OL]. <https://history.nasa.gov/SP-287/sp287.htm>. 1971-01-01.
- [34] 马尚君、刘更. 航天器结构的模块化设计方法综述[J]. 机械科学与技术, 2011, (6): 961-967.
- [35] 崔乃刚、王平. 空间在轨服务技术发展综述[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 805-810.
- [36] Kleinknecht, K. S. 'Design Principles Stressing Simplicity'[EB/OL]. <https://klabs.org/history/reports/sp287/ch2.htm>. 2023-02-03.
- [37] 徐姝静. 代码女神拯救阿波罗[J]. 创新世界周刊, 2020, (5): 94-97.
- [38] Sadeh, E. 'Societal Impacts of the Apollo Program'[EB/OL]. https://astrosciology.org/Library/PDF/Impacts_Sadeh.pdf. 2015-04-21.
- [39] Byerly, J. *Space Policy Reconsidered*[M]. Boulder: Westview Press, 1989.
- [40] Collingridge, D. *The Management of Scale: Big Organizations, Big Technologies, Big Mistakes*[M]. London: Routledge, 1992, 3-18.
- [41] 'The First Space Stations'[EB/OL]. National Air and Space Museum, <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/first-space-stations>. 2023-08-15.
- [42] Eriksson, J., Newlove-Eriksson, L. M. 'Outsourcing the American Space Dream: SpaceX and the Race to the Stars'[J]. *Astropolitics*, 2023, 21(1): 46-62.
- [43] 张颖一、张伟. 国外载人深空探测的现状与发展趋势

- 分析[J]. 中国航天, 2019, (11): 54-59.
- [44] Holland, T. A. 'From Apollo to the ISS: The Televisual Image in Human Spaceflight'[J]. *Television & New Media*, 2023, (1): 57-73.
- [45] 沈艳波、郭姣姣 等. 我国深空探索领域国际合作模式思考[J]. 中国航天, 2022, (5): 35-39.
- [46] 葛平、张天馨 等. 2021年国际深空探索的进展与展望[J]. 中国航天, 2022, (2): 9-19.
- [47] 'ISRO, Chandrayaan2'[EB/OL]. https://www.isro.gov.in/Chandrayan_2.html?__cf_chl_tk=sYXZ4I2Zu2EYEWwfBD_zs45PdPLss_a_GbmqfliaxcWI-1712744162-0.0.1.1-1642. 2019-07-22.
- [48] 吴伟仁、于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报, 2014, 1(1): 5-17.
- [49] NASA. 'CubeSats and Smallsats'[EB/OL]. <https://www.topics/cubesats>. 2024-01-06.
- [50] Omar, A. A., Farag, M. M., Alhamad, R. A. 'Artificial Intelligence: New Paradigm in Deep Space Exploration'[A], *2021 14th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*[C], Sharjah, United Arab Emirates, 2021, 438-442.
- [51] Robert, P. M. 'Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot (RASSOR) Excavator: U.S. Patent 9,027,265'[P]. 2013 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2015-03-12.
- [52] Hoffman, J. A., Rapp, D., Hecht, M. 'The Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) on the Mars 2020 Rover'[A], *AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition*[C], Pasadena, California, 2016, 82-87.

[责任编辑 李斌]