

技术突破与管理创新：阿波罗计划科技遗产三维透视

Technological Breakthrough and Management Innovation:

A Three-Dimensional Perspective on the Scientific and Technological Heritage of the Apollo Program

张恒力 /ZHANG Hengli 李昂 /LI Ang 张雅欣 /ZHANG Yaxin

(北京航空航天大学马克思主义学院, 北京, 100191)

(School of Marxism, Beihang University, Beijing, 100191)

摘要:阿波罗登月计划作为人类科技探索太空里程碑,在技术、管理、科技文化领域形成丰富遗产。技术路径维度揭示土星五号F-1发动机推力突破、阿波罗制导计算机实时容错机制创新、闭环生命维持系统等关键技术奠定现代航天工程基础;系统管理维度阐明实现“集中决策与分权执行”动态平衡四级管理架构,及钱学森工程控制论对阿波罗系统管理模式的交流与创新;科技文化维度探究“实践导向师承模式”人才培养、矩阵式组织变革形成自我持续创新文化传承机制。深化对技术创新与组织管理互动关系的理论认知,拓展对复杂工程管理范式跨文化适应机制的理解,丰富科技遗产代际传承与跨领域扩散的理论内涵,为中国航天强国战略提供借鉴。

关键词:阿波罗计划 科技遗产 技术创新 工程管理

Abstract: As a milestone in space exploration, the Apollo Program left a multifaceted legacy in technology, management, and scientific culture. In terms of technological paths, critical innovations such as the Saturn V F-1 engine's thrust capacity, the Apollo Guidance Computer's real-time fault tolerance, and closed-loop life support systems laid the groundwork for modern aerospace. In terms of system management, the Program demonstrated a four-tier management structure to realize the dynamic balance of "centralized decision-making and decentralized execution" and the exchange and innovation of Qian Xuesen's engineering cybernetics on Apollo system management mode. In terms of scientific and technological culture, it fostered the cultural inheritance mechanism in the training of talents with the "practice-oriented mentorship model" and in forming self-sustained innovation through matrix organizational change. This study deepens the theoretical insights into the interaction between technological innovation and organizational management, expands the understanding of cross-cultural adaptation in complex engineering management paradigm, enriches the theories on the intergenerational and cross-disciplinary diffusion of technological heritage, and offers some theoretical and practical implications for China's aerospace strategies.

Key Words: Apollo Program; Scientific and technological heritage; Technological innovation; Engineering management

中图分类号: C931; N031 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2025.12.003 CSTR: 32281.14.jdn.2025.12.003

基金项目: 国家社会科学基金重大项目“现代科技中的伦理问题研究”(项目编号: 24&ZD226)。

收稿日期: 2025年7月10日

作者简介: 张恒力(1976-)男,江苏徐州人,北京航空航天大学马克思主义学院教授,研究方向为科技伦理。Email:

bjjszxt@126.com

李昂(1994-)女,贵州六盘水人,北京航空航天大学马克思主义学院博士研究生,研究方向为科技伦理教育。

Email: buaalang1994@163.com

张雅欣(2002-)女,北京人,北京航空航天大学马克思主义学院硕士研究生,研究方向为科技伦理。Email:

wszyx13661067037@163.com

20世纪60年代美国国家航空航天局组织实施的阿波罗登月计划,以其空前的技术复杂性和工程规模,成为人类科技史上具有划时代意义的重大科技实践。作为人类历史上规模最宏大、技术最复杂、影响最深远的科技工程之一,阿波罗登月计划在技术创新、系统管理和科技文化等多维度上留下丰富的科技遗产。

技术遗产方面,现有成果多为对不同登月阶段的技术总结。约翰·汉利(John Hunley)指出,土星五号火箭的F-1发动机与低温推进剂管理技术,至今仍是当代重型火箭的设计基准,其模块化多级架构与燃烧稳定性解决方案奠定了重型火箭设计范式。^[1]管理遗产方面,阿波罗作为复杂项目管理范式的领先地位,多关注项目内部的单维度管理模式,聚焦系统方法、风险管理与跨组织协作。^[2]科技文化研究方面,主要聚焦宏观评估,威廉姆斯·戴夫(Dave Williams)和豪厄尔·伊丽莎白(Elizabeth Howell)指出,阿波罗组织文化是成功的关键决定因素。^[3]它激励了一代又一代的年轻科学家、工程师和探险家,激发了对STEM领域(科学、技术、工程和数学)的教育兴趣。^[4]现有研究多停留在单一维度的技术总结或管理模式分析,缺乏对多种要素协同演进机制的系统性阐释。构建技术路径、系统管理、科技文化三维框架,透视阿波罗计划科技遗产的内在逻辑,为当代航天科技创新实践提供借鉴。

一、技术路径遗产: 阿波罗计划的关键技术创新

阿波罗计划在动力系统、制导计算机、生命维持系统三个核心技术领域实现历史性突破,为现代航天工程奠定基础。

1. 动力系统创新革命

土星五号火箭作为阿波罗计划的核心装备,由冯·布劳恩(Wernher von Braun)团队设计,采用模块化三级架构,代表了20世纪60年代航天工程的技术巅峰。其设计理念深刻影响了后续重型火箭发展,模块化架构被现代火箭广泛采用。从F-1发动机的燃烧稳定性突破

到液氢推进剂的规模化应用,动力技术遗产至今仍在推动航天工业发展。

重型运载火箭技术开发过程中,以土星五号火箭设计为首的运载系统革命存在三项突出技术遗产。第一,多级火箭结构与材料创新。土星五号采用模块化三级设计,即第一级(Saturn-IC, S-IC)提供脱离地球引力的初始推力;第二级(Saturn-II, S-II)使用液氢推进剂完成大气层外加速;第三级(Saturn-IVB, S-IVB)负责进入地月轨道。([5], pp.92-96)这种分级结构通过“阶段分离技术”实现质量递减,成为现代运载火箭的标准架构。其中,第二、三级发动机的推进系统技术突破。F-1发动机作为核心动力装置,推力至今仍保持世界纪录。J-2发动机的多次点火技术直接催生了航天飞机主发动机(Space Shuttle Main Engine, SSME);而低温推进剂管理经验则为太空发射系统(Space Launch System, SLS)的液氢储箱设计提供了参考。第三,燃料储存与低温推进技术。液氢的储存与使用是土星五号技术革命的核心之一,阿波罗项目开发了多层铝箔复合绝热材料,并采用氦气加压,系统维持储箱的结构稳定性。^[6]此外,低温推进剂的“快速加注技术”缩短了发射准备时间,这一流程后被航天飞机项目继承。在推进剂管理上,土星五号首次大规模应用液氢液氧组合,形成的推力远超传统煤油发动机。这种高效推进系统使土星五号能够将阿波罗飞船加速至第二宇宙速度,从而精准实现月球轨道注入。^[7]

2. 计算机制导系统构建

阿波罗计划中的计算机制导系统由三大核心模块构成:惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、光学观测系统(Sextant)和阿波罗制导计算机(Apollo Guidance Computer, AGC),一方面通过陀螺仪与加速度计感知飞船运动状态,另一方面通过恒星定位修正惯性导航误差,与阿波罗制导计算机的实时计算能力深度耦合。

阿波罗制导计算机在软硬件层面改写了航天工程的基础技术范式。一方面,阿波罗制导计算机的运行基于优先级调度的实时操作系

统，任务程序分为多个“作业”，按优先级动态分配计算资源，并采用汇编语言编程，代码高度优化以节省存储空间。另一方面，阿波罗制导计算机的系统设计以任务关键性为导向，在发动机点火阶段，系统会暂停低优先级任务，确保导航计算的即时性。^[8]在容错机制方面引入“重启保护”和“指令校验”技术，若检测到程序错误，计算机会自动回滚至安全状态，而非完全崩溃。

阿波罗制导计算机的实时操作系统为现代航天器的自主导航奠定了基础。SpaceX的载人龙飞船（Crew Dragon）采用基于优先级调度的操作系统，其任务中断响应机制与“作业分时”逻辑高度相似。阿波罗计划在算法创新与系统架构上的核心逻辑，构成了现代航天工程的理论基石。从深空探测器的多源融合导航，到商业航天器的自主控制，乃至民用精准定位基础设施，其遗产影响广泛而深远。

3. 生命维持系统临界突破

从舱外航天服的轻量化设计到闭环环境控制系统的构建，阿波罗计划中的生命维持技术至今仍在全球航天工程中发挥功用。

伙伴生命保障系统的协作设计是阿波罗计划中安全立场和协作理念的重要依据。第一，在阿波罗登月任务中，舱外航天服是宇航员生存的关键屏障，相当于“第二层皮肤”。阿波罗计划中的舱外航天服采用多层复合结构，从内衬层的柔韧性到外防护层的机械强度，每一层材料都经过精密优化，以平衡防护性能与重量限制。（[5]，pp.231-233）第二，“便携式生命维持系统”（Portable Life Support System, PLSS）可谓是阿波罗宇航员的“生命之源”。这一背包式系统需在有限空间内集成氧气供应、温控与电力供应功能，确保宇航员在月面长达8小时的生存能力。（[5]，p.234）便携式生命维持系统的技术突破解决了短期舱外生存难题，其中的资源闭环理念为更大规模的环境控制系统提供了设计范式。第三，在狭小的指令舱内，维持氧气循环与水再生是长期任务的关键，阿波罗的“环境控制系统”（Environmental Control and Life Support System, ECLSS）通

过内生循环的闭环设计，大幅降低对地面补给的依赖，成为深空探索的里程碑。第四，阿波罗计划中的“伙伴生命保障系统”（Buddy Life Support System, BLSS）通过信息联络与资源共享，为进行深空任务的宇航员提供双重保险。关键在于氧气互通与联合温控，系统允许宇航员共享资源以应对技术故障时的紧急情况，保障任务安全与人员安全。

二、系统管理遗产： 阿波罗计划的组织范式创新

阿波罗计划以其复杂的工程规模与技术整合，催生了现代系统工程管理理论的范式创新，奠定了复杂工程管理体系的基石。

1. 理论范式与组织架构的协同演进

阿波罗计划构建了超越传统科层制的复杂工程管理范式，核心在于平衡集中决策与分散执行的矛盾。通过工作分解结构将登月任务拆分为6大系统、3000余子任务，运用关键路径法优化进度管理，显著提升工程效率，验证了系统工程在超大规模项目中的适用性。据此，经过对其系统工程管理框架核心特征的高度概括，阿波罗计划的管理经验催生了“多层级多领域”（Multi-Level Multi-Domain, MLMD）理论，描述了NASA如何通过分层级、分领域的方式，有效组织、协调和控制涉及数十万人、数万家承包商、跨越无数技术学科的庞大工程体系。一方面横向整合军工资源，军民协同进行技术开发，另一方面促进技术的纵向迭代，逐步进行包括返回舱在内的技术验证。^[9]同时促进全球化协作，构建国际协作网，吸引多国参与数据共享，奠定国际航天合作基础。阿波罗计划中的工程管理理论逐渐成为包括“阿尔忒弥斯计划”在内的现代探月工程的核心框架。在更具体的系统工程模型方面，NASA基于阿波罗经验构建了“系统工程知识体系”（Systems Engineering Body of Knowledge, SEBoK），从需求定义到验证测试形成闭环，确保技术指标可追溯，^[10]并将技术划分为9级，明确工程阶段的准入门槛（Technology Readiness Level,

TRL $\geq$ 6),^[11]为后续国际空间站、航天飞机等国际项目提供了重要的方法论基础。

在管理理念层面,阿波罗计划形成了以技术民主化、动态适应性和风险共担为核心的创新文化。第一,主张集思广益、群策群力,建立“异议表达制度”,鼓励跨学科专家挑战权威方案,以此确认计划可行性,避免集权腐败现象。^[9]第二,动态适应性方面,采用“滚动预算”机制,五年间调整资金配置37次,其中1966年将制导系统预算从8%提升至15%,在成本控制与技术突破间保持张力。^[12]第三,政府与承包商通过“成本加成合同”分摊创新风险,激发企业积极性,政府承担70%研发风险,企业仅对生产环节负责。

具体的管理实践方面,阿波罗计划构建了“四级管理架构”,开创了“集中决策”与“分权执行”并行的工程管理模式。顶层由NASA总部与国会形成战略决策层,通过《国家航空航天法案》确立美国国家航空航天局的法定统筹地位。^[13]计划管理层设立阿波罗计划办公室,首创“系统工程部”与“专业中心”的矩阵架构,其管理手册详细规定了17类技术评审节点。^[12]执行层依托三大航天中心形成技术闭环,马歇尔航天中心在冯·布劳恩领导下建立“设计-制造-测试”一体化流程,^[14]土星五号火箭的F-1发动机研发中,团队通过2143次点火试验将燃烧不稳定性问题从30%发生率降至0.01%。^[12]承包商层为激发企业创新,北美航空为登月舱研发投入1.2万名工程师,其薪酬结构中创新奖励占比达15%。^[15]这种分层授权体系被学者迈克尔·约翰·诺伊费尔德(Michael John Neufeld)视为“科层制与扁平化组织的完美平衡”。其次,阿波罗计划首次系统应用“故障树分析法”(Fault Tree Analysis, FTA),针对服务舱液氧系统建立842个故障节点模型,^[16]将质量管理推向科学化阶段。一方面,通过贝叶斯网络计算得出各子系统可靠性指标,实施严格的技术状态管理;另一方面,所有设计变更需经冯·布劳恩等五人小组审批,建立四级变更控制委员会。^[14]与此同时,阿波罗计划推行“测试优先”理念,登月舱发动机累计通过

2000小时点火测试,其中连续燃烧时间达600秒,远超实际任务所需的450秒。^[15]上述管理模式创新使系统可靠性达到99.9%,为后续航天飞机项目建立高标。

2. 政府指导下企业产业的双重协作

阿波罗计划通过整合顶尖科研机构与数万家企业,构建了由政府主导的复杂协作网络与产业链协同创新体系,其组织架构与制度设计形成了普适性的工程管理范式,成功实现了知识从航天领域向多产业的系统性迁移。企业协作网络层面,NASA通过分层承包体系,将波音、洛克希德等一级承包商作为技术集成枢纽,向下延伸出覆盖2万家企业的协作网络。^[16]这种模式的核心在于通过制度设计实现风险共担与责任传导。一方面,采用“成本加激励费用合同”(Cost-Plus-Incentive-Fee)平衡企业创新动力与财政风险;^[17]另一方面,通过技术整合委员会(Technical Integration Group, TIG)与配置控制委员会(Configuration Control Board, CCB)建立跨层级的协调机制。这种协作链模式推动了航天产业链的模块化重组,为后续产业迁移奠定了基础。

产业迁移层面,阿波罗计划催生的工程管理范式形成了跨领域扩散效应与产业外溢效应。迁移并非简单复制,而是结合产业特性进行适应性改造。半导体行业在20世纪80年代引入阿波罗计划中的“故障模式与影响分析”(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)方法,通过建立“工艺控制基线”(Process Control Baseline)提升芯片良率。^[18]阿波罗计划的工程管理范式已超越航天领域,成为现代复杂制造业的通用方法论。

3. 交流创新: 钱学森的工程控制论

中国航天事业在技术追赶进程中,深刻吸收并创造性转化了这一管理遗产,钱学森的工程控制论就是其中的典型案例,在跨时空的思想交流方面,构建了具有中国特色的航天工程管理模式。

在管理理论层面,阿波罗计划采用工作分解结构和关键路径法,通过量化模型优化资源配置,这与钱学森工程控制论中的“系统优化”

思想不谋而合。^[19]钱学森进一步将控制论从技术层面提升至哲学高度，提出“从定性到定量综合集成方法”，主张将领域专家经验与严谨数学模型深度融合，为复杂系统工程决策提供科学支撑。^[20]这一思想在中国航天实践中得到充分体现。在中国长征火箭的研制进程中，应用计划评审技术（Program Evaluation and Review Technique, PERT）网络图进行进度管控的同时，通过总体设计部组织专家研讨，动态调整技术路线，^[21]充分体现了中国的本土化创新。

在管理架构方面，阿波罗计划通过“矩阵式管理”整合政府、企业与科研机构资源，建立了任务导向的协作体系；苏联则依赖高度集中的行政指令，但在跨部门协同上存在短板。^[22]中国在吸收双方经验时采取了折中策略，借鉴阿波罗计划的分阶段评审和技术基线控制，同时结合自身国情强化集中领导。^[23]针对工业基础薄弱的现实问题，钱学森创造性地提出“两条指挥线”的“双轨模式”，将技术决策（设计师系统）与资源调度（行政指挥系统）二元分立并辩证统一，^[24]让“专业院”与“型号院”并驾齐驱，专业院负责技术预研，型号院聚焦工程集成。^[25]这一模式在东风-2导弹失利后加速完善，通过《国防部第五研究院暂行条例》确立了技术指挥线与行政指挥线并行的责任体系。^[26]“东西合璧”的管理哲学，保障了中国航天在技术竞速中的高质与高效。

三、科技文化遗产： 阿波罗计划的人才培养与价值传播

阿波罗计划的科技文化遗产通过知识传承和组织学习，在三个层面持续影响着当代科技创新：微观上重塑了科学家群体，中观上规范了技术伦理与协作机制，宏观上则变革了创新资源配置与知识网络。

1. 个体层面：工程师群体的专业精神与能力培养

阿波罗计划科学家群体展现出不畏艰难、追求卓越的科学精神成为文化遗产的核心要

素。回溯历史，在阿波罗时代，往往需要数日执行更改、分析影响、重写代码，并重新对设计进行仿真。^[27]这一理念引导科学家团队建立了严格的测试标准与验证机制，如“故障模式与影响分析”（FMEA）方法，^[28]该方法后作为认知工具迁移至航空、医疗等高风险系统领域。基于传承，阿波罗科学家精神通过价值符号的文化传播实现了跨文化、跨时代的延续，成为全球航天文化认同体系的重要组成部分。亚马逊创始人杰夫·贝佐斯（Jeff Bezos）自我叙述：“当我5岁的时候，我看到尼尔·阿姆斯特朗踏上月球，这激发了我对科学和探索的热情。”^[29]跨文化传播的科学精神为全球航天合作构建了超越地缘政治的共同价值基础，构成独特“技术与文化”双重传承机制。

阿波罗计划在人才培养方面形成四个关键特征：非传统人才招聘、跨学科知识融合、“实践导向的师承模式”和知识循环网络与创新扩散机制。第一，非传统人才招聘与开放式创新环境的培育。阿波罗计划中采用非常规的人才招募策略，招收大量缺乏太空工程经验但具有数学、物理等基础学科背景的年轻人才，形成高度创新的开放式人才生态系统。查尔斯·斯塔克·德雷珀（Dr Charles Stark Draper）在研究所汇聚了当时一些最为杰出的人才，尽管背景各异，但受过良好教育的人员集中于同一平台。^[30]第二，跨学科知识融合与复合型人才培养。阿波罗计划打破了传统学科壁垒，建立独特跨学科人才培养模式。多学科融合培养了一批能够横跨航天、控制系统等多领域的复合型人才，为后续航天和计算机科学发展奠定人才基础。第三，“实践导向的师承模式”混合式知识传承体系。阿波罗计划构建了一种将显性知识与隐性知识有机结合的独特传承模式。阿波罗14号任务期间，登月舱的中止开关故障威胁到成功着陆。工程师们在两个小时内编写并测试了新软件，使计算机忽略错误的中止信号，继续着陆序列。^[31]“实践导向的师承模式”模式使复杂知识高效传递，为解决前所未有的技术挑战提供了人才保障。第四，知识循环网络与创新扩散机制。阿波罗计划创造了具有高度

自组织性的知识循环网络,实现了“集中培养、分散应用、再集中”的扩散模式。项目结束后,相关技术人才带着航天领域的前沿知识进入各个领域。阿波罗制导计算机是第一台数字通用、多任务、交互式便携式计算机,为今天的数字世界奠定了基础,从商用喷气式客机的电传驾驶舱到携带的多任务智能手机。^[32]

2. 企业文化:工程组织文化的转型

阿波罗计划对企业技术伦理的范式重构主要在三个方面:责任伦理的强化、安全文化的制度化,以及透明度与问责机制的出现。责任伦理强化主要体现在企业决策机制的变革。^[33]北美航空公司(North American Aviation, NAA)作为阿波罗指令与服务舱的主承包商,在项目初期产生了严重的质量问题。为应对这一问题,NASA促使NAA实施了其内部的组织结构革新,建立了“系统工程部”与“专业中心”的矩阵架构,形成更具通透性的责任传递机制。此类结构革新超越了单纯的技术协调,实质上重新定义了企业内部的伦理决策机制,允许基层工程师通过正式渠道向管理层提出安全与质量隐患。阿波罗计划中的安全文化系统主要构建在多层次的冗余保障机制上。硬件设计和组织结构配备多重审核机制,每个关键系统必须经过三个独立团队的设计评审。安全文化从机构层面到操作层面形成了完整的安全责任链,对后来的航空航天工业安全实践产生了深远影响。阿波罗计划在透明度与问责机制方面的创新在于前所未有的开放监督体系。NASA与承包商之间建立了“开放记录”制度,“四级变更控制委员会”确保重大设计变更的可追溯性。透明度要求促使企业内部建立更为严格的质量追溯系统,从而在组织内部植入了问责机制。

阿波罗计划在企业协作模式上的制度创新,涵盖垂直整合管理、跨组织知识共享与风险共担机制三个核心层面。首先,在垂直整合管理模式中,NASA作为系统集成者,建立了四级分包体系,即NASA总部负责总体规划,主承包商(如北美航空、格鲁曼)承担子系统集成,二级承包商专司关键部件,三级供应商提供基础材料。其次,跨组织知识共享机制是

阿波罗协作模式的关键创新。NASA建立了从需求定义到最终实现的完整知识转换体系。以格鲁曼公司为例,该公司最初提交的提案为初步构想,实际设计工作需要与NASA进行深度协作方能完成。登月舱在研制过程中经历了全面的设计迭代,期间整合了数百项重大技术改进方案。迭代式的知识共享过程表明,NASA与承包商之间建立了深度的技术协作关系。更进一步,风险共担机制构成了阿波罗企业协作的关键。NASA通过创新性的合同设计,将技术风险与财务激励相结合。面对全新的技术挑战,格鲁曼公司能够承接登月舱项目,很大程度上依赖于NASA的技术支持和风险分担。格鲁曼最终获得了97.7%的飞行激励费用,达到17,986,000美元。^[34]创新合同模式既保障了企业的基本收益,又激励其在未知领域取得技术突破,为后续大型公共项目的契约设计提供了重要参考。

3. 创新生态:从“登月竞赛”到开放科学

阿波罗计划在其实施过程中孕育了一个具有鲜明特征的跨领域科技共同体,共同体通过价值内核的建构、方法论体系的共享以及人才网络的流动,形成了对后续科技发展产生深远影响的传承机制。价值传承角度看,阿波罗科技共同体构建了以“探索精神、协作理念、卓越追求”为核心的价值体系,通过制度化机制在NASA内部得以系统性传承,并经由人才流动向更广泛的科技领域扩散,形成了所谓的“阿波罗文化基因”。方法论共享角度看,阿波罗计划形成的系统工程方法、质量控制技术,成为科技共同体的共享知识资产。系统工程方法的标准化角度看,阿波罗计划建立“五位一体”的管理架构,即计划控制、系统工程、测试、可靠性与质量保证、飞行操作等五大功能模块,实现了NASA总部对整个计划的集中管理与全面控制,确保了技术系统的有机整合,更为重要的是形成了可复制、可推广的管理范式。技术标准化工具的创新则体现在阿波罗时期开发的“配置管理”(Configuration Management)和“接口控制文档”(Interface Control Document)等方法,代表了当时最先

进的技术管理方法，后续被广泛应用于大型工程项目。接口文档不断更新，以适应中心的发展。没有接口，最终的开发就无法进行，而接口需要开发硬件的知识。^[35]人才流动是科技共同体传承的关键机制。阿波罗计划结束后，项目参与者的职业流向呈现三元分化格局。其一，部分人员继续在NASA从事航天科研工作，确保技术经验的直接传承；其二，部分人员进入大学和研究机构，参与学术活动培养新一代航天人才；其三，部分人员进入工业界，推动航天技术向民用领域的转移应用。人才扩散效应催生了多个技术密集型产业集群，形成了具有自我强化特征的区域创新生态。

阿波罗计划通过学科交叉和跨国协作两大路径，持续塑造着全球科技创新格局。NASA必须将不同的机构文化和方法融合成一个包容性的组织，沿着一条统一的道路前进。^[36]在学科交叉维度，阿波罗计划推动多学科融合与新兴领域的诞生。航天医学与生理学研究催生了现代远程医疗技术；材料科学与结构工程的结合推动了复合材料革命；计算机科学与控制理论的融合加速了嵌入式系统发展。1965年NASA总部内部报告称，阿波罗导航和制导计算机使用了15万个“微电路”。^[37]阿波罗计算机对集成电路的大规模采购推动了半导体行业技术发展，催生了现代电子产品中的集成电路。在跨国协作维度，阿波罗计划虽然是冷战竞争的产物，却意外促成了后续航天领域的国际合作。一方面，阿波罗的技术标准和工程规范被广泛采纳，为全球航天活动提供了共同语言；另一方面，阿波罗后的“阿波罗-联盟测试计划”（Apollo-Soyuz Test Project, ASTP）开启了美苏航天合作，为国际空间站合作奠定了基础。从技术扩散视角看，阿波罗计划催生的创新成果经多渠道向全球传播。其一，借助学术交流，NASA发布的众多技术报告为全球研究机构所引用；其二，通过商业许可，将大量阿波罗技术转让至私营部门；其三，开展国际培训项目，接纳多国访问学者与工程师。阿波罗计划的技术国际扩散速度显著快于同期其他领域，成为推动全球技术同步化的重要力量。

四、若干启示

阿波罗计划表明，重大科技工程的成功需要技术创新、管理创新与文化创新的协同发力。技术创新解决“能否实现”的基础问题，管理创新解决“如何实现”的路径问题，文化创新解决“持续发展”的动力问题。三者相互促进、缺一不可，共同构成复杂工程创新的完整生态系统。

对中国航天强国战略而言，应避免简单的技术追赶模式，注重原创性突破与系统性创新的有机结合，在强化“双轨制”管理模式制度化建设的同时，构建跨学科人才培养体系和开放式创新生态。面向未来，阿波罗计划的科技遗产研究聚焦于三个重点方向，一是探索阿波罗技术遗产在新兴航天技术中的选择性吸收与创造性转化机制；二是分析国家主导与市场驱动两种创新范式的融合路径；三是研究科技文化遗产的数字化传承与全球化扩散机制。

〔参考文献〕

- [1] Hunley, J. D. *The Development of Propulsion Technology for US Space-launch Vehicles: 1926-1991* [M]. Texas: Texas A&M University Press, 2007.
- [2] 李锴、陈国玖、刘志强等. 美国航天工业管理模式分析及启示 [J]. 航天工业管理, 2021, (11): 73-76.
- [3] 威廉姆斯·戴夫、豪厄尔·伊丽莎白. 向NASA: 学工程师文化 [M]. 刘博洋译, 杭州: 浙江教育出版社, 2022, 154.
- [4] Apollo11 Space. 'How the Apollo Program Was Initiated' [EB/OL]. <https://www.apollo-society.org/how-the-apollo-program-was-initiated/>. 2025-02-07.
- [5] 汤姆·伦德. 月球的早期探索: 从“徘徊者”到“阿波罗”，从“月球号”到“鲁尼·考瑞特” [M]. 彭祺攀等译, 北京: 中国宇航出版社, 2023.
- [6] Brooks, C. G., Grimwood, J. M., Swenson, L. S. *Chariots for Apollo: The NASA History of Manned Lunar Spacecraft to 1969* [M]. New York: Dover Publications, 2012.
- [7] Bilstein, R. E. *Stages to Saturn: A Technological History of the Apollo/Saturn Launch Vehicle* [M]. Washington: Diane Publishing, 1999, 203.
- [8] Martin, F. H., Battin, R. H. 'Computer-controlled Steering

- of the Apollo Spacecraft'[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1968, 5(4): 400-407.
- [9] 李存金、王俊鹏. 重大航天工程设计方案形成的群体智慧集成机理分析——以阿波罗登月计划为例[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(S1): 103-109.
- [10] Bennett, F. V. 'Apollo Experience Report: Mission Planning for Lunar Module Descent and Ascent'[R]. No. NASA-TN-D-6846, 1972.
- [11] 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.
- [12] Drucker, E. E., Pooler, W., Wilemon, D. L., et al. 'Project Management in the Apollo Program: Interim Report'[R]. NASA, 1970.
- [13] 李成智、李建华. 阿波罗登月计划研究[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [14] Neufeld, M. J. 'Von Braun and the Lunar-orbit Rendezvous Decision: Finding a Way to Go to the Moon'[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63(1-4): 540-550.
- [15] Sadeh, E. 'Societal Impacts of the Apollo Program'[R]. Grand Forks, ND: Department of Space Studies, University of North Dakota, 2006.
- [16] Neufeld, M. J. *The Von Braun Paradigm and NASA's Long-Term Planning for Human Spaceflight*[A], Dick, S. J. (Ed.) *NASA's First 50 Years: Historical Perspectives*, [C], Washington, DC: NASA, 2010, 325-347.
- [17] Sayles, L. R. *Managing Large Systems: Organizations for the Future*[M]. New York: Routledge, 2017.
- [18] Morris, P. R. *A History of the World Semiconductor Industry*[M]. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990.
- [19] Kossiakoff, A., Sweet, W. N., Seymour, S. J., et al. *Systems Engineering Principles and Practice*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [20] 钱学森、宋健. 工程控制论(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [21] 王礼恒. 中国航天系统工程[J]. *航天工业管理*, 2006, (10): 60-64.
- [22] McCurdy, H. E. *Faster, Better, Cheaper: Low-cost Innovation in the US Space Program*[M]. Baltimore: JHU Press, 2001.
- [23] Blanchard, B. S. *System Engineering Management*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.
- [24] 钱学森、许国志、王寿云. 组织管理的技术——系统工程[J]. *上海理工大学学报*, 2011, 33(6): 520-525.
- [25] 中国运载火箭技术研究院. 钱学森与中国航天系统工程[A], 宋健: 钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集[C], 北京: 中国科学技术出版社, 2001, 220-223.
- [26] 赵少奎、杨永太. 工程系统工程导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [27] Gran, R. J., Saarela, O. 'The-Apollo-11-Moon-Landing-Spacecraft-Design-Then-and-Now'[EB/OL]. <https://ww2.mathworks.cn/company/technical-articles/the-apollo-11-moon-landing-spacecraft-design-then-and-now.html>. 2019-7-20.
- [28] Quality Miners GmbH. 'FMEA Failure Mode and Effects Analysis'[EB/OL]. Quality Miners, <https://quality-miners.de/en/caq-software/fmea/>. 2024-01-24.
- [29] 帕特·诺里斯. 接力与超越: 阿波罗之后再续人类登月史[M]. 孙书剑译. 北京: 电子工业出版社, 2021, 106.
- [30] Future Markets Magazine. 'The Apollo Guidance Computer'[EB/OL]. <https://future-markets-magazine.com/en/innovators-en/the-apollo-guidance-computer/>. 2020-12-24.
- [31] MIT News. 'MIT and NASA: A Match Made In The Heavens'[EB/OL]. <https://news.mit.edu/2001/commnasa-0606>. 2001-06-06.
- [32] The Wall Street Journal. 'Apollo 11 Had a Hidden Hero: Software'[EB/OL]. <https://www.wsj.com/articles/apollo-11-had-a-hidden-hero-software-11563153001>. 2019-07-14.
- [33] Fries, S. D. *NASA Engineers and the Age of Apollo*[M]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1992, 172.
- [34] Erickson, A. S. 'Lessons from the Lunar Module Program: The Director's Conclusions'[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 177: 514-536.
- [35] Seamans, R. C. *Project Apollo: the Tough Decisions*[M]. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 2005, 104.
- [36] Launius, R. D. 'Apollo: A Retrospective Analysis'[R]. Washington, DC: NASA Headquarters, 1994.
- [37] NASA Headquarters. 'Electronic Systems Program Review'[R]. Washington, DC: NASA Office of Program and Special Reports, 1965, 5.

[责任编辑 李斌]