



中国深空探测任务规划与实施的启示

李静文¹, 贾阳^{2*}

1. 北京信息科技大学 管理科学与工程学院, 北京 100085;

2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

摘要: 中国深空探测任务实施二十年间, 在月球探测、火星探测等领域取得了一系列显著成就, 包括月球背面的软着陆、巡视勘察, 以及采样返回等一系列的国际首次, 是中国对人类社会进步与发展的新贡献, 也赢得了全球的广泛赞誉。深空探测工程的技术难度大, 进度要求紧张, 项目管理工作复杂, 工程设计过程面临的约束众多, 需要同时处理好设计的先进性与可实现性、系统功能复杂性与技术实现能力、空间恶劣的环境与任务可靠性、空间环境模拟的复杂性与地面验证充分性等诸多关系。通过丰富的实践探索, 在继承与创新、进度与质量把控、风险管理等方面积累了一定经验, 总结这些经验, 将有助于后续复杂工程实施的借鉴与参照, 并在更广泛的科技活动中得以推广。

关键词: 工程管理; 重大工程; 嫦娥工程; 天问工程; 深空探测

中图分类号: N945.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)02-0234-09

引言

国家科技重大专项是由国家统筹规划, 集中优势资源, 旨在实现核心技术突破、研发重大战略产品及完成重大工程的计划。其目的在于攻克科技发展的重大瓶颈, 推动国家整体科技进步, 最终实现提升国家综合竞争力的战略目标^[1-2]。我国月球探测的发展路线, 被分成了“探”“登”“驻”3个阶段, 又称为“大三步”^[3]: 第一步“探”, 即无人月球探测, 旨在

了解月面环境, 勘探月球资源分布; 第二步是“登”, 实现载人登月, 航天员将在月面进行短期活动, 攻克月面生命保障技术; 第三步是“驻”, 即航天员驻守月球基地, 开发利用月球资源, 以支持人类社会的发展。“大三步”中的第一步被列为国家重大科技专项, 在这一阶段中又分为“绕”“落”“回”三步, 即绕月遥感探测、月面软着陆与巡视探测、采样返回任务, 简称“小三步”。“小三步”目标已经圆满完成, 后续工作也在有序推进中^[4]。

收稿日期: 2024-12-31; **修回日期:** 2025-02-08

作者简介: 李静文 (1969—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为复杂工程项目规划方法。E-mail: nanshan1919@sina.com

*贾阳 (1970—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为深空探测项目管理。E-mail: jiayangdoc@sohu.com (通讯作者)

引用格式: 李静文, 贾阳. 中国深空探测任务规划与实施的启示[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(2): 234-242. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240157. CSTR: 32282.14.JES.20240157

Li J W, Jia Y. Enlightenment from the Planning and Implementation of China Deep Space Exploration Missions[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(2): 234-242. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240157. CSTR: 32282.14.JES.20240157

把目光投向更远的深空, 我国的“天问一号”火星探测任务已经圆满完成, 后续小行星与彗星探测、火星采样返回、木星探测等工程任务也已进入研制阶段^[5]。中国航天早期技术发展独具时代特色, 围绕政治与经济发展需求, 突破国际封锁, 走出了一条自力更生的工程实施道路, 并在任务规划、技术发展路径选择、工程管理方法等方面积累了丰富的研究成果^[6]。随着社会、经济与技术的不断进步, 中国已开启了深空探测的新篇章。在深空探测任务取得工程研制进展的同时, 也积累了丰富的工程规划与实施经验。本文将系统梳理中国深空探测任务的规划与实施历程, 深入剖析其在工程管理、技术创新、团队建设以及精神传承等方面的成功经验, 并通过对深空探测任务的全面回顾与总结, 为后续复杂工程项目的实施提供有益的借鉴与参考, 并以此纪念我国深空探测发展的二十年历程。

1 深空探测工程系统

深空探测工程系统的组成部分包括: 探测器系统、运载火箭系统、测控系统、发射场系统、地面应用系统、回收系统等。探测器系统是实现探测活动的直接主体, 在工程实施中起着主导作用。

探测器系统负责完成各类深空探测器的研制, 受到环境恶劣和资源紧张的限制, 探测器的研制需要研发各种新材料、新工艺、新器件, 技术难度大, 是工程的主线。运载火箭系统负责研制运载火箭, 提供探测器发射所需要的动力, 发射的成功是后续任务顺利完成的基础。发射场系统主要负责组织指挥火箭的发射, 还有为探测器在发射场的组装、测试提供保障条件。测控系统主要负责探测器的轨道测量、飞行控制等。地面应用系统负责数据接收、运行管理、数据预处理、数据管理、科学应用、地外天体样品的地面处理与存储等。回收系统主要负责返回器再入地球后的搜索与回收。

2 深空探测工程实施情况

我国深空探测工程包含月球探测和行星际探测两

个方面, 首先介绍月球探测任务情况。

2007年“嫦娥一号”发射, 11月7日进入工作轨道, 11月26日公布第一幅月面图像, 2009年3月1日任务结束后, 卫星在地面控制下成功撞向月球^[7]。这次任务圆了中华民族千年的奔月梦想, 开启了中国人走向深空的时代, 继人造地球卫星、载人航天之后, 它成为了我国航天事业发展历程中的第三个里程碑^[8-9]。

“嫦娥二号”卫星于2010年发射, 首次获得了7 m分辨率的全月球立体影像, 首次实现了从月球轨道飞赴日-地拉格朗日L2点探测, 首次实现了与4179号“图塔蒂斯”小行星近距离交会^[10]。

“嫦娥三号”探测器于2013年发射, 着陆在月球正面虹湾附近, 我国第一辆月球车“玉兔号”驶抵月球表面。这次任务是我国首次在地外天体实施软着陆, 并完成巡视探测^[11], 是航天技术发展的又一个里程碑^[12]。

“嫦娥五号”再入返回飞行试验器于2014年发射, 任务是对“嫦娥五号”将要使用的高速返回地球技术进行飞行试验验证^[13]。

“鹊桥”号中继通信卫星于2018年发射, 是中国首颗、也是世界首颗地球轨道外专用中继通信卫星, 主要任务是把在月面背面着陆的“嫦娥四号”探测器发出的科学数据传回地球, 并把地面发出的控制指令转发给“嫦娥四号”探测器^[14]。一同发射的还有哈尔滨工业大学研制的“龙江一号”“龙江二号”两颗微小卫星, 与火箭分离后, “龙江一号”在第一次点火修正轨道后与地面失去联系, “龙江二号”顺利进入月球轨道, 完成月球背面全景拍摄^[15]。

“嫦娥四号”探测器于2018年发射升空, 在月球背面预选区着陆, “玉兔二号”月球车在月球背面留下了道道车辙, 实现了人类首次月球背面的软着陆和巡视探测^[16]。

“嫦娥五号”探测器是我国第一个月面取样返回探测器, 2020年发射升空, 在月球正面着陆, 并携带月球样品着陆地球^[17]。

“鹊桥二号”中继通信卫星于2024年发射, 该卫星主要为“嫦娥六号”及后继任务提供中继支持^[18]。

“嫦娥六号”探测器于2024年发射, 着陆在月球背面南极-艾特肯盆地, 这是人类首次采集月球背面

土壤和岩石样品, 并将其带回地球进行科学研究^[19]。

后续在月球探测方面安排了南极永久阴影区探测任务, 并将逐步扩建成月球科研站。

行星际探测方面, 2011年“萤火一号”探测器搭乘俄罗斯运载火箭发射升空, 可惜发射失败, 卫星没有进入飞赴火星的轨道^[20]。

“天问一号”探测器于2020年7月23日发射, 2021年5月15日在火星北半球平原地区成功软着陆, 随后“祝融号”火星车开始行驶、探测, 在火星上首次留下中国印迹^[21-22]。

在行星际探测领域, 后续规划涵盖了小天体探测及木星探测等一系列任务。

3 深空探测工程成果

深空探测是世界航天活动的重要领域之一, 也是一个国家综合国力和创新能力的体现, 已经取得一系列成果^[23]。

3.1 建立了我国深空探测工程技术体系

深空探测工程技术极具挑战性, 其实施标志着我国正从航天大国向航天强国的行列迈进, 是“航天梦”与“中国梦”的组成部分。工程的推进, 在探测器研发、深空测控通信、运载火箭技术以及发射场的发射服务能力等多个维度, 构建起了全面的深空探测工程体系, 为深化深空探测技术、拓宽探测领域奠定了坚实基础。

3.2 获得了一批在国际学术界有影响力的科学探测成果

在月球地形地貌的详查、次表层月壤结构的探测、月基天文学研究、火星及小行星探测等领域, 我国发布了一系列具有国际影响力的科学探测成果, 特别是成功发现了月球特有的岩石种类——“嫦娥石”。这些成就全面提升了我国空间科学研究的水平, 并获得了国际同行的广泛关注。

3.3 全面推动了航天技术的跨越式发展

在航天器总体设计、热控制系统设计、电源系统

设计以及测控系统设计等领域的技术突破, 提升了航天器的技术水平。通过机械臂、水升华器、两相流体回路、主动悬架、集热窗等众多新型高性能设备与产品的深入研发, 航天技术得以全面迈向更高层次的发展阶段^[24]。这些努力使我国掌握了在复杂约束条件下进行航天系统任务设计与验证的方法, 涵盖了系统设计、技术风险控制及地面验证方法等多个维度。以“祝融号”火星车所采用的集热窗为例, 该技术将能源利用效率从30%大幅提升至80%, 成功解决了火星低温环境下探测器的保温难题, 属于国际首创。

3.4 取得了良好的社会效益

深空探测技术是信息技术、材料技术、能源技术等多种高科技的综合体现, 它不仅能为尖端科技打造一个军民融合、寓军于民的独特发展平台, 而且其深化研究和转化成果还将在智能家居、智能车辆及危险环境自动化作业等多个领域得到广泛应用, 从多个维度推动国民经济的发展。深空探测所致力于解答的重大科学问题, 蕴含着强烈的社会性、群众参与性和科普价值, 这对于提升国民科学素养、产生广泛的社会效益具有重要意义。

3.5 培养了一支深空探测团队

深空探测任务实施的过程造就了一批年轻的高素质科技和管理人才, 是未来开展深空探测活动, 推进我国航天事业发展的重要力量^[25]。

4 工程规划与实施的启示

深空探测工程的技术难度大, 进度要求严苛, 项目管理工作错综复杂, 且工程设计过程中需应对诸多约束。这要求同时妥善处理设计的先进性与实际可行性、系统功能的复杂性与技术实现的能力、空间恶劣环境下的任务可靠性, 以及空间环境模拟的复杂性与地面验证的充分性等关系^[26]。通过持续的实践活动, 在继承与创新、进度管理与质量把控、风险管理等方面积累了丰富的经验, 总结这些经验, 将为后续复杂工程的实施提供有益的借鉴与参考。

4.1 继承与创新

我国的国情决定了在航天工程中追求成功具有至关重要的意义。在工程实施的过程中,特别是在系统方案的选择上,必须妥善处理好继承与创新之间的辩证关系。

航天事业是高风险的事业,在国际上已经实施的深空探测任务中,成功的任务所占的比例仅略高于50%^[27]。为确保任务成功,在航天器设计过程中,严格限制了新产品、新技术的应用比例,一般低于20%~30%。但是深空探测任务复杂,探测器经历的环境恶劣,系统资源约束严格,完全使用既有航天产品,无法满足工程设计的约束条件,必须进行创新,比如“嫦娥三号”探测器的产品中,新产品例高达80%。

为了化解这一矛盾,在探测器的设计流程中,高度重视任务分析与约束条件分析,尽可能使用成熟技术,并实施过程控制、全面验证等措施,以确保产品的可靠性,减少简单的设备备份。尽管无法实现产品的直接继承,但强调产品设计中的技术继承,对没有经过飞行试验验证的材料、工艺进行充分的地面鉴定试验。例如,对气凝胶材料进行了严格鉴定,并将其成功应用于火星车在火星稀薄大气环境下的热控制系统中,取得了显著成效。

4.2 进度与质量

在探测器研制历程中,研制进度与质量往往面临冲突,“好”与“快”之间存在着固有的矛盾。处理这一矛盾的原则是:坚守质量至上的原则,确保进度服从于质量,通过保障质量来推动并确保进度的顺利实现。鉴于国家宏观形势的要求,中国航天人必须力求在进度与质量上并驾齐驱。为了在既定时间内达成既定目标,需探寻精简的技术方案,竭力降低系统内部界面的复杂度,并遵循“奥卡姆剃刀”原理(即“如无必要,勿增实体”),从而减少研制过程中的反复现象^[28]。

一个典型的探测任务,从立项至发射,约需六年时间,历经方案阶段、初样阶段及正样阶段,依次确立功能基线、研制基线、生产基线。方案阶段聚焦于关键技术攻关产品的研制,旨在验证探测器关键技术

的突破情况。初样阶段则通过结构、热、电、辐射等工程模型的研制与试验,验证系统设计的正确性,并通过鉴定件的研制,确认单机产品的功能、性能及环境适应性。正样阶段则通过飞行产品的研制与试验,确保正样产品的质量达标。整个研制过程工作繁重,时间紧迫,且存在阶段交叉的情况。

为此采取的措施包括:安排结构等长周期产品先行完成研制,提前转入下一阶段;长线产品提前投产;辅线工作提前抓,避免由于工作安排原因产生进度紧张;对推迟交付的产品,调整测试次序,减少对进度的影响;在月球车的内场试验中,双班测试,减少测试准备、撤收次数,提高测试效率;明确短线责任单位和责任人,采取特别措施加速进度;并在全系统营造以不产生短线为荣、确保各自负责产品流程准时的管理文化氛围。

4.3 优化与最优

构成工程系统的总体、分系统、单机及组件之间,必然存在着相互关联、相互作用与相互制约的特定关系。这些关系的存在促使物质、能量、信息得以交换,从而使系统状态持续发生变化。探测器设计的本质是一个在严格约束条件下进行的目标优化问题。总体优化需依据深空探测任务的具体需求,进行系统分析,通过方案比较与选择,优化总体布局、技术实现路径,以期达到系统最优的目标。在探测器设计的过程中,结合自身特点,采用了系统设计优化的方法,以应对布局空间、重量、质心位置等约束条件。此方法分为系统层与单机层两个层面来实施。

在系统层,梳理了各分系统及其组成部分的功能与性能需求,采用功能复用、功能集成及布局优化等手段,完成了系统方案的设计优化。而在单机层,深入分析了影响单机设备或部件优化目标的关键参数,运用结构优化、单机优化及电缆优化等方法,实现了单机方案的优化设计^[29]。设计中真正做到了“克克计较”,这些设计思想、工具及方法的进步,有力地推动了航天器总体设计水平的提升。

4.4 风险管理

航天项目的风险涵盖技术风险、质量风险及管理

风险等多个方面。深空探测工程所面临的风险具体包括：因对目标天体复杂环境的认知不足及设计考量不周全而引发的残余风险；探测器资源紧张所带来的系统设计风险；以及在解决质量问题过程中，由于技术状态变更、进度延误、流程调整等因素，造成的设计验证不充分的风险。得益于研制团队的积极努力，上述风险已得到有效控制并成功规避。

风险管控的主要方法包括：对系统设计及工程实施的关键环节，采用多方复核复审机制，以确保设计的准确性及产品质量的合规性；借助信息流图和产品接口控制单，清晰描绘系统内部的耦合关系，并详细规定设备间的机械、电气、热接口标准，从而确保系统内部接口的协调与匹配；针对各阶段的验证与测试活动，进行全面周密的策划，以保障功能及性能确认的充分性；严格控制技术状态，尤其加强对最终状态确认工作的策划与实施力度；注重条件保障建设与型号技术要求之间的匹配性，并确保建设工作提前到位；通过责任链的细化分解，明确工作过程中各阶段、各环节、各设备及各项功能实现的责任人；运用交集分析等风险评估的半定量手段，确保风险识别的全面性；重视故障预案的制定及其验证工作，以保障预案的有效性^[30]。一旦发生质量问题，立即集中优势资源，力求在最短时间内高效处置，最大限度地减少对研制主线的影响。

4.5 工程中的人

由叶培建院士领衔的创新团队，针对深空探测器系统设计的复杂性与技术高难度，持续致力于技术突破，不断刷新“中国高度”，成功实现了中华民族千年的飞天梦想。深空探测团队被评为国家科技创新团队，且团队成员平均年龄仅为三十岁。

团队设计的探测器，创造了世界深空探测史上的“中国纪录”，每次飞行均赢得了国际宇航机构的高度关注，充分彰显了我国的综合国力与科技实力，进一步提升了我国的国际威望。该团队运用系统工程方法，提升了系统创新能力，构建了以总体设计部为引领、关键技术攻关团队为核心、多学科专业技术人才为支撑，以及国内顶尖科研院所积极参与的团队管理创新体系。在此基础上，他们联合了国内数百家科研

院所和数十所高校，共同组成了专业广泛覆盖、技术带动显著、优势互补、强强联合的深空探测国家队。同时，深空的神秘莫测与探测的挑战性，强烈激发了青少年的好奇心，必将点燃一代又一代年轻人的科学热情，为科技事业不断注入新鲜的后备力量^[31]。

4.6 精神

嫦娥工程在圆满达成各项任务的同时，也铸就了我国深空探测事业的珍贵财富——“探月精神”：追逐梦想、勇于探索、协同攻坚、合作共赢^[32]。

任务的复杂性与环境的多变性，使得嫦娥工程面临着全方位的技术挑战。团队不畏艰险，发挥聪明才智，勇于探索，攻克了众多传统航天任务未曾触及的技术难关。例如，针对月夜长时间低温环境下探测器的生存难题，团队在比较了月夜低功耗工作方案、温度唤醒方案、时间唤醒方案及光照唤醒方案的利弊后，综合考虑了可靠性要求和资源需求，在国际上首次采用了月夜系统全断电策略，待进入月昼后再利用光照进行唤醒。同时，团队还通过两相流体回路引入了同位素热源的能量，成功解决了月夜生存问题。

嫦娥工程标志着我国深空探测事业的起步，其任务特性和资源限制要求我们，在沿用我国航天工程现有技术与方法的同时，必须攻克众多关键技术，创造性地提出新颖的工程方法与技术手段，开辟前人未至的新径。创新涵盖原始性创新、集成创新及引进消化再创新等多个层面，这些在工程中均有鲜明体现：原始性创新如两相流体回路技术的研发与应用；集成创新体现在综合电子技术的拓展与应用上；引进消化再创新则包括同位素热源的引进及其创新性运用。作为一项复杂的系统工程，嫦娥工程势必遭遇众多技术挑战。在技术攻关、方案规划、接口协调、问题解决的过程中，团队秉承探月精神，诸如核源安装^[33]、月球车遥操作^[34]、火星探测器发射重量控制^[35]等一系列技术难题，均在工程总体的统一调度下得以破解。研制团队瞄准世界航天科技发展的前沿，科学求实、尊重规律、反复试验，做到有问题共同解决，有风险共同承担，有余量共同掌握，有困难共同克服。鉴于航天器不可维修的特性，研制过程中的细节把控至关重要，细节往往决定成败。团队高度重视方案设计中

接口的匹配性、验证试验的完备性、技术状态控制的全面性, 对任何疑点都严查不怠。团队从多角度、不同工作模式、技术状态及飞行过程阶段出发, 进行深入分析与综合考虑, 全员齐心协力, 确保工作“一次做对, 一次做好”。

5 结论

我国深空探测起步二十年来, 取得了连胜的成绩。在月球背面软着陆、巡视探测、采样返回更是人类首次, 赢得了全球赞誉。深空探测工程的技术难度大, 进度紧张, 项目管理工作复杂, 工程设计过程面临的约束众多, 需要同时处理好设计的先进性与可实现性、系统功能复杂性与技术实现能力、空间恶劣的环境与任务可靠性、空间环境模拟的复杂性与地面验证充分性等诸多关系。本文系统回顾了中国深空探测任务二十年的发展历程, 详细分析了其在工程系统构建、任务实施、技术创新、工程管理等方面的成就与经验。研究得出以下结论:

(1) 深空探测工程的系统性与复杂性: 中国深空探测任务涵盖了探测器系统、运载火箭系统、测控系统、发射场系统、地面应用系统和回收系统等多个系统, 各系统相互关联、相互制约。任务的成功实施依赖于系统的整体优化与协同运作, 体现了复杂工程系统的典型特征。

(2) 技术创新与工程实践的深度融合: 在深空探测任务中, 技术创新是推动任务成功的关键因素。同时, 工程实践也为技术创新提供了应用场景和验证平台, 实现了技术与工程的良性互动。

(3) 工程管理方法的创新与完善: 深空探测任务

的高技术难度和复杂性对工程管理提出了极高的要求。中国在深空探测任务中探索并完善了一系列工程方法, 包括继承与创新的平衡、进度与质量的协调、风险的有效管控等。这些管理方法不仅保障了任务的顺利实施, 也为后续复杂工程项目的管理提供了有益的借鉴。

(4) 深空探测对国家科技发展的推动作用: 深空探测任务的实施不仅提升了中国在航天领域的技术水平和国际影响力, 还带动了相关学科的发展, 如材料科学、信息科学、能源科学等。同时, 深空探测技术的转化应用也为国民经济的发展提供了新的动力, 体现了科技对社会的广泛影响。

(5) 深空探测精神的传承与弘扬: 嫦娥工程等深空探测任务铸就了“追逐梦想、勇于探索、协同攻坚、合作共赢”的探月精神, 这种精神不仅激励着深空探测团队不断前行, 也为整个国家的科技创新和科技发展注入了强大的精神动力。

总之, 嫦娥工程等国家科技重大专项的实施, 在完成重大战略产品、关键共性技术和重大工程的同时, 在工程管理方面也积累了丰富的经验。通过对任务规划过程进行分析, 以及对工程管理中资源冲突解决、技术攻关突破、系统方案优化、人的作用发挥等方面的经验进行总结、凝练, 对未来的科技工程发展规划、实施具有指导意义, 值得在更广泛的科技活动中推广。与此同时, 也要看到工程实施过程中在探测效率、载荷研制、科学研究、成果转化等方面还存在进一步提升的空间, 需要进一步关注国际深空探测呈现出的众多新兴国家参与、商业航天迅速发展、人工智能技术与深空探测任务相结合等发展趋势, 继续总结经验, 走有中国特色的深空探测发展道路。

参考文献

- [1] 万钢, 许惊. 国家重大科技专项的创新管理: 电动汽车重大科技专项管理实践[J]. 中国软科学, 2002(12): 76-80.
Wan G, Xu J. Innovation management of national key S & T special projects-management practice on the key S & T project of electric automobile[J]. China Soft Science, 2002(12): 76-80.
- [2] 冯身洪. 国家科技重大专项内涵及定位研究[J]. 中国软科学, 2014(9): 165-171.
Feng S H. Research on connotation and strategic positioning of the major national science and technology projects[J]. China Soft Science, 2014(9): 165-171.

- [3] 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 13-18.
Ye P J, Peng J. Deep space exploration and its prospect in China[J]. Engineering Science, 2006, 8(10): 13-18.
- [4] 胡浩, 王琼, 胡浩德, 等. 人类首次月球背面采样返回"嫦娥" 六号任务综述[J]. 中国航天, 2024(7): 7-13.
Hu H, Wang Q, Hu H D, et al. Comprehensive overview of the Chang'e-6 mission: Mankind's historic first lunar farside sampling and return[J]. Aerospace China, 2024(7): 7-13.
- [5] 赵宇鹄, 周迪圣, 李雄耀, 等. 国际火星探测科学目标演变与未来展望[J]. 科学通报, 2020, 65(23): 2439-2453.
Zhao Y Y, Zhou D S, Li X Y, et al. The evolution of scientific goals for Mars exploration and future prospects[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(23): 2439-2453.
- [6] 刘纪原. 中国航天事业发展的哲学思想[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013.
Liu J Y. Philosophical Thoughts on the Development of China's Space Industry[M]. Beijing: Peking University Press, 2013.
- [7] 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.
- [8] 温家宝在"嫦娥一号"首张月面图片发布仪式上讲话[EB/OL]. (2007-11-26) [2024-11-26]. https://www.gov.cn/ldhd/2007-11/26/content_815918.htm.
Wen Jiabao's speech at the ceremony for releasing the first lunar surface image captured by Chang'e-1[EB/OL]. (2007-11-26) [2024-11-26]. https://www.gov.cn/ldhd/2007-11/26/content_815918.htm.
- [9] 中青在线. 在庆祝我国首次月球探测工程圆满成功大会上胡锦涛同志的讲话[EB/OL]. (2007-12-12)[2024-11-26]. https://zqb.cyol.com/content/2007-12/13/content_1993311.htm.
China Youth Online. Speech by Comrade Hu Jintao at the celebration of the successful completion of China's first lunar exploration project [EB/OL]. (2007-12-12) [2024-11-26]. https://zqb.cyol.com/content/2007-12/13/content_1993311.htm.
- [10] 叶培建, 黄江川, 张廷新, 等. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望[J]. 中国科学(技术科学), 2013, 43(5): 467-477.
Ye P J, Huang J C, Zhang T X, et al. Technical achievements of the Chang'e-2 satellite and prospects for China's deep space exploration[J]. Science China (Technological Sciences), 2013, 43(5): 467-477.
- [11] Sun Z Z, Jia Y, Zhang H. Technological advancements and promotion roles of Chang'e-3 lunar probe mission[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(11): 2702-2708.
- [12] 中国政府网. 习近平会见嫦娥三号参研参试代表 李克强等参加会见[EB/OL]. [2014-01-06]. https://www.gov.cn/guowuyuan/2014-01/06/content_2590377.htm.
China Government Portal. Xi Jinping meets with representatives involved in the research and testing of Chang'e-3; Li Keqiang and others attended the Meeting [EB/OL]. [2014-01-06]. https://www.gov.cn/guowuyuan/2014-01/06/content_2590377.htm.
- [13] 胡浩, 董光亮, 裴照宇, 等. 嫦娥五号任务再入返回段测控总体设计与实现[J]. 宇航学报, 2023, 44(5): 670-676.
Hu H, Dong G L, Pei Z Y, et al. Design and implementation of TT & C scheme of reentry and return phase of the Chang'e-5 mission[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(5): 670-676.
- [14] 朱林崎. 鹊桥重架上界通, 千秋灵会此宵同: 探秘鹊桥二号中继卫星[J]. 中国国家天文, 2024(7): 26-31.
Zhu L Q. The Magpie Bridge is once again connected to the upper boundary, and the spirit of the millennium will meet here at night: Exploring the second relay satellite of Magpie Bridge[J]. Chinese National Astronomy, 2024(7): 26-31.
- [15] 韦明川, 胡超然, 阎敬业, 等. 首颗自主地月转移微卫星"龙江二号"[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 790-799.
Wei M C, Hu C R, Yan J Y, et al. Longjiang-2: The first independent earth-moon-transfer microsatellite[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 790-799.
- [16] 刘继忠, 栗湘伟, 韩啸, 等. 基于嫦娥四号工程实践的复杂重大工程OSTA四元组方案论证方法研究[J]. 工程管理科技前沿, 2022, 41(4): 9-15.
Liu J Z, Su X W, Han X, et al. The OSTA four-tuples scheme demonstration method of complex and major projects based on Chang'e 4 project[J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management, 2022, 41(4): 9-15.
- [17] 郑燕红, 邓湘金, 顾征, 等. 嫦娥五号月面表取采样点选择[J]. 光学 精密工程, 2021, 29(12): 2935-2943.
Zheng Y H, Deng X J, Gu Z, et al. Lunar surface sampling point selection of Chang'e 5[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(12): 2935-2943.
- [18] 郝策, 王勇, 关轶峰, 等. 鹊桥二号中继星自主角动量管理设计及其实现[J]. 空间控制技术与应用, 2024, 50(6): 42-49.
Hao C, Wang Y, Guan Y F, et al. Design and application of momentum management for Queqiao-2 relay satellite[J]. Aerospace Control and

- Application, 2024, 50(6): 42-49.
- [19] 胡浩, 王琼, 胡浩德, 等. 人类首次月球背面采样返回"嫦娥"六号任务综述[J]. 中国航天, 2024(7): 7-13.
Hu H, Wang Q, Hu H D, et al. Comprehensive overview of the Chang'e-6 mission: Mankind's historic first lunar farside sampling and return[J]. Aerospace China, 2024(7): 7-13.
- [20] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. "萤火一号"火星探测计划进展和Mars-SST火星卫星重力测量计划研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 44-48, 76.
Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress in "Yinghuo-1" martian exploration program and research on Mars-SST satellite gravity measurement mission[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 44-48, 76.
- [21] 孙泽洲, 饶炜, 贾阳, 等. "天问一号"火星探测器关键任务系统设计[J]. 空间控制技术与应用, 2021, 47(5): 9-16.
Sun Z Z, Rao W, Jia Y, et al. Key mission system design of Tianwen-1 Mars probe[J]. Aerospace Control and Application, 2021, 47(5): 9-16.
- [22] 李茂登, 黄翔宇, 徐超, 等. 天问一号火星探测器EDL过程自主导航技术[J]. 宇航学报, 2022, 43(1): 11-20.
Li M D, Huang X Y, Xu C, et al. Autonomous navigation technology of Tianwen-1 Mars probe during EDL process[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(1): 11-20.
- [23] 李静文, 贾阳. 关于探月工程的规划和贡献[J]. 国防科技工业, 2019(1): 26-29.
Li J W, Jia Y. Planning and contribution of lunar exploration project[J]. Defence Science & Technology Industry, 2019(1): 26-29.
- [24] 吴伟仁, 张哲, 敖显泽, 等. 深空物质资源利用现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 6-15.
Wu W R, Zhang Z, Ao X Z, et al. Utilization of deep space matter resources: State of the art and prospects[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(19): 6-15.
- [25] 中国深空探测航天器创新团队获科学技术进步奖[EB/OL]. [2015-01-22]. <http://www.cast.cn/CastCn/Show.asp?ArticleID=48236>.
The Chinese deep space exploration spacecraft innovation team was awarded the science and technology progress award[EB/OL]. [2015-01-22]. <http://www.cast.cn/CastCn/Show.asp?ArticleID=48236>.
- [26] 贾阳, 申振荣, 庞戭, 等. 月面巡视探测器地面试验方法与技术综述[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(5): 464-469.
Jia Y, Shen Z R, Pang Y, et al. A review of field test methods and technologies for lunar rover[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(5): 464-469.
- [27] 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.
- [28] 于澄, 颜萍. 奥卡姆剃刀的管理学意义[J]. 学海, 2006(6): 173-176.
Yu C, Yan P. The management implications of Occam's Razor[J]. Journal of Academic Studies, 2006(6): 173-176.
- [29] 张旺军, 申振荣, 李群智, 等. 月球巡视器的系统设计优化方法研究[J]. 航天器工程, 2014, 23(3): 4-11.
Zhang W J, Shen Z R, Li Q Z, et al. Study on system design and optimization method of lunar rover[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(3): 4-11.
- [30] 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.
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.
- [31] 郭磊, 蔡虹, 张洁. 国家科技重大专项对我国国家科技创新竞争力的提升作用研究[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(1): 101-106.
Guo L, Cai H, Zhang J. Research on the function of national S & T major project on national S & T innovative competitiveness enhancement[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013, 30(1): 101-106.
- [32] 石玉. 探月精神: 攻坚克难九天揽月的壮丽凯歌[J]. 科学大众(智慧教育), 2024(1): 1-2.
Shi Y. The spirit of lunar exploration: A magnificent ode to overcoming difficulties and reaching for the moon[J]. Popular Science (Wisdom Education), 2024(1): 1-2.
- [33] 吴明烨, 王焕玉, 张承模, 等. 嫦娥三号粒子激发X射线谱仪距离探测模拟验证[C]//中国空间科学学会第七次学术年会会议手册及文集. 大连, 2009: 335.
Wu M Y, Wang H Y, Zhang C M, et al. Simulation verification of distance detection for Chang'e-3 particle-induced X-ray spectrometer[C]//Proceedings of the Seventh Annual Academic Conference of the Chinese Society of Space Science. Dalian, 2009: 335.
- [34] 贾阳, 孙泽洲, 郑咏, 等. 星球车技术发展综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 419-427.
Jia Y, Sun Z Z, Zheng Y, et al. Overview on development of planetary rover technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5):

419-427.

[35] 周东, 徐晓伟, 贾阳, 等. 火星车机构集成控制系统设计与实现[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 450-457.

Zhou D, Xu X W, Jia Y, et al. Design and implementation of integrated control system for Mars rover mechanism[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 450-457.

Enlightenment from the Planning and Implementation of China Deep Space Exploration Missions

Li Jingwen¹, Jia Yang^{2*}

1. School of Management Science and Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100085, China;

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

Highlights

Deep space missions require innovation due to design constraints. Technological inheritance is key, though product inheritance is not feasible.

Quality trumps speed; schedule must comply with quality to ensure and enhance progress.

Probe design is an optimization problem under constraints, aiming for overall optimal, reliable, and reachable goals.

Graphical Abstract



Abstract: Over the past two decades since the implementation of China's deep space exploration missions, a series of achievements have been made in fields such as lunar exploration and Mars exploration. The soft landing on the far side of the moon, the roving and survey, as well as the sample return and a series of other firsts in the international arena are China's new contributions to the progress and development of human society and have also won the admiration of the world. The deep space exploration project has high technical difficulties, tight schedule requirements, complex project management work, and numerous constraints faced in the engineering design process. It is necessary to properly handle many relationships at the same time, such as the advancement and realizability of the design, the complexity of system functions and the technical realization ability, the harsh space environment and mission reliability, and the complexity of space environment simulation and the adequacy of ground verification. Through abundant practical activities, some experiences have been formed in aspects such as inheritance and innovation, schedule and quality, and risk management. Summarizing these experiences is conducive to providing references for the implementation of subsequent complex projects and promoting them in a wider range of scientific and technological activities.

Keywords: engineering management; major projects; Chang'e Project; Tianwen Project; deep space exploration