

我国探月工程技术发展综述

于登云¹, 吴学英³, 吴伟仁²

(1. 中国航天科技集团公司, 北京 100048; 2. 探月与航天工程中心, 北京 100037; 3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 我国的探月工程, 在2020年前分“绕、落、回”三步实施。本文以我国探月工程各次任务为脉络, 针对目前已经完成的“嫦娥1号”“嫦娥2号”“嫦娥3号”及“嫦娥5号”高速再入试验任务, 简述了工程和科学目标, 介绍了实施效果, 总结了主要技术成就。在此基础上, 展望了探月工程未来的发展趋势, 给出了月球后续任务的总体思路和框架。

关键词: 探月工程; 技术成就; 展望

中图分类号: V41

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2016)04-0307-8

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.04.002

引用格式: 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.

Reference format: 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.

0 引言

月球是地球唯一的天然卫星, 也是人类迄今为止探测最多的地外星球。20世纪90年代, 我国已经开始进行月球探测工程的前期研究。我国的探月工程, 在2020年前分“绕、落、回”三步实施, 所谓“三步走”战略。我国第一个月球探测器“嫦娥1号”卫星于2007年10月成功环月探测, 圆满实现了探月工程一期“绕”的目标; 2010年10月, “嫦娥2号”卫星作为探月工程二期任务的先导星, 成功完成了环月的先导探测, 并完美地完成了多阶段拓展任务, 通过一次发射任务完成了月球、日地拉格朗日L2点、图塔蒂斯小行星的多目标探测; 2013年12月14日, “嫦娥3号”探测器成功着陆月球虹湾地区, 12月15日, “玉兔号”月球车与着陆器顺利分离, 其行走的车辙印在了月球表面。“嫦娥3号”任务圆满成功, 首次实现了我国航天器在地外天体软着陆和巡视勘察, 标志着我国探月工程第二步战略目标的全面实现。2014年11月1日, “嫦娥5号”高速再入试验任务的返回器在内蒙古四子王旗地区顺利着陆, 标志着我国月球探测领域技术的又一次重大进步。根据目前计划, “嫦娥5号”月球采样返回器将在2017年左右发射, 从而圆满实现我国月球探测工程的三步走目标。

本文以我国探月工程各次任务为脉络, 简述了工程和科学目标、介绍了实施效果, 总结了主要技术成就。在此基础上, 展望了探月工程未来的发展趋势,

给出了月球后续任务的总体思路和框架。

1 “嫦娥1号”任务

1.1 任务概述

2004年1月23日, 探月工程一期正式获批立项, 揭开了我国开展月球及深空探测活动的序幕。经过3年多的研制, 2007年10月24日, 我国发射了第一个月球探测器——“嫦娥1号”卫星, 实现了继人造地球卫星、载人航天之后我国航天活动的第三个里程碑, 初步构建了完整的工程体系, 使我国跨入世界上具有深空探测能力的国家行列^[1]。

“嫦娥1号”任务的工程目标是: 研制和发射我国第一颗月球探测卫星; 初步掌握绕月探测基本技术; 首次开展月球科学探测; 初步构建月球探测航天工程系统; 为月球探测后续工程积累经验。

“嫦娥1号”任务开展4类科学探测: 获取月球表面三维影像; 分析月球表面元素含量和物质类型的分布特点; 探测月壤特性; 探测地月空间环境。

10月24日, “嫦娥1号”卫星由“长征3号甲”运载火箭在西昌卫星发射中心发射成功, 11月5日, 卫星准确进入了环月轨道。11月26日, 第一张月面图片正式对外发布(如图1所示), 这是当时世界上已公布的最为清晰、完整的月球影像图。“嫦娥1号”任务实现了“准时发射、准确入轨、精密测控、精确变轨、成功绕

月、取得成果”的预定目标，“嫦娥1号”卫星传回大量月球科学探测数据，工程取得了圆满成功。



图1 “嫦娥1号”拍摄的全月影像图

Fig. 1 The lunar photo by the Chang'e-1

1.2 主要成就

首次探月工程的圆满完成，使我国跨入了世界上为数不多的具有深空探测能力的国家行列，这是我国综合国力显著增强、自主创新能力和科技水平不断提高的重要体现，对于提高我国国际地位，增强民族凝聚力，具有十分重大的现实意义和深远的历史意义。

“嫦娥1号”任务在以下9个方面取得了重大技术创新：

1) 总体集成技术

综合卫星工程、火箭工程、测控通信、月球科学、系统工程等多学科技术，进行大系统顶层优化，兼顾继承和创新，结合对国际月球探测和深空探测发展趋势和技术的研究，高起点地确定了工程总体方案，获得了工程大系统的整体功能和整体最优。

2) 轨道设计技术

针对地月相对位置、测控要求、运载发射条件、燃料携带量、月影分布、月食时机等一系列约束条件，首创了包括调相轨道、最小能量地月转移轨道和多次制动的月球捕获轨道的轨道设计方案，确保了任务可靠性和工程实施的可行性。

3) 环境适应和能源技术

国内首次创立了月球表面温度场分布模型和采用了变红外星球外热流分析技术，完成了月球环境的外热流分析；创新进行了卫星等温化设计技术和高适应能力的智能主动控温技术，满足了“嫦娥”卫星的绕地飞行、奔月飞行、绕月飞行、月食等全过程热设计需求，创造性地完成了适应地、月轨道卫星的热控设计。“嫦娥1号”卫星的热控系统在当时国内同类飞行器中最复杂的，它实现了在轨温度的精确控制。采用氢镍蓄电池组设计技术、多母线/多域统一控制技术、多模式智能化电源控制技术、多级可转换全调节开关分流技术等，成功满足了高轨（奔月轨道）、低轨（环月轨道）对能源的需求。

4) 飞行控制技术

通过系统优化设计、原始和集成创新，建立了我国首个适应深空探测卫星的高精度、高可靠、高自主、高速度GNC系统体系结构，创新研制了紫外月球敏感器、双轴驱动机构、星敏感器、加速度计等国内领先的高性能产品，国内首次突破了多敏感器信息组合定姿、三体指向自主控制、高精度高可靠自主轨道控制、更高性能自主故障诊断与隔离和系统容错与重构等关键技术。以接近理想的状态一次完成了各项姿态、轨道机动和绕月飞行控制，轨道控制精度达到国内领先、国际先进水平。

通过构建地月转移轨道控制模型，优化轨道计算方法，精确标定控制参数等技术，突破了基于最小燃料消耗和时间优化的轨道重构技术，实现了最优控制策略。创新性地设计了大时延动态补偿模型，实现了大时延低码速率精确发令及比判，使上行控制精度达到了毫秒量级；设计了多模式遥测条件下指令比判的数据优选原则及分级判断方法，提高了指令执行比判的实时性；首次计算分析了月食期间卫星进出阴影的情况，提出了卫星相位调整的控制方案，使月食期间卫星在阴影区的时间最短，为卫星安全度过月食期提供了保障；突破了月球引力场不规则条件下的轨道维持技术，设计了满足卫星月面星下点轨迹及轨道高度约束的轨道维持方案。

5) 远距离测控通信技术

在我国缺乏深空测控设施的条件下，立足国内现有测控资源，坚持系统协作，星地协调设计，设计了我国首个深空探测测控数传星载系统和地面收发分离的“USB（S频段微波统一系统）+18 m单收天线”组合系统，通过增大星上发射功率、采用信道编解码技术、增大地面接收能力等手段，以最少的经济投入和较短的时间周期，解决了40万 km的远距离测控问题；研制出应用于深空探测任务的大角度机械扫描天线，保证了科学数据传输，实现了我国地月距离的可靠测控数传。

6) 高精度测定轨技术

坚持多学科集成、多部门协作，运用系统工程方法，在我国现有航天测控网（USB系统）与射电天文观测网（VLBI系统）的基础上，通过集成创新，建立了USB-VLBI综合测定轨系统，解决了我国“嫦娥1号”任务中关键的测定轨问题。采用先进的窄带测量技术改造USB测控设备，使测距测速精度较原有指标显著提高，达到了目前国际同类设备先进水平；在VLBI中采用快速相关处理技术，实现了轨道测量的准实时工

作，突破了射电天文原有的事后处理工作模式，适应了实时任务的需要。通过高精度USB测距测速和VLBI测角相结合，实现了“嫦娥1号”任务卫星轨道的高精度测量。

首次建立了我国月球轨道的动力学模型，突破了USB与VLBI数据融合定轨、月球捕获短弧快速定轨和卫星动量卸载轨道修正等技术，形成了我国“嫦娥1号”任务的测定轨理论方法体系，实现了月球卫星精密定轨。

7) 火箭可靠性增长技术

控制系统采用了平台—激光惯组主从冗余、速率陀螺冗余和故障诊断技术，实现了控制自主切换，提高了控制系统的飞行可靠性。

对氢氧发动机进行了涡轮泵端面密封性能、液氧系统抗多余物能力、加载弹簧性能、减压阀对飞行环境的适应能力等方面的技术改进，提高了产品可靠性。

对输送增压系统进行了增压单向活门、冷氦电磁阀、冷氦减压器、冷氦压调器、耗气组件等项目的设计改进，降低了出现单点失效故障模式的机率。

对地面发射支持系统进行了氢、氧加排自动脱落连接器低温二次对接、III-2常温连接器脱落等项目的技术改进，有效提高了火箭发射可靠性。

8) 高可靠发射技术

根据任务要求，对发射工位及相关设施进行了全面升级改造，实现了发射场远距离测试发射，达到高可靠发射场建设要求，确保了准时发射；摆杆驱动系统首次采用了阀芯反馈检测和系统冗余热备份技术；吊装设备采用了变频数字检测技术，建立了精确定位模型；另外，还采用了地勤环网冗余技术、信息快速处理技术、供电可靠性增长技术，全面提升了设施设备的综合可靠性。选择了桩基础建设方案，解决了新塔结构体系难题，在我国首次实现了原址翻建发射工位；采用光纤中继代替微波无线中继传送宽带射频信号技术，满足了卫星RF信号传输要求；首次研制了可伸缩的回转小吊车，优化了卫星/整流罩分体吊装对接流程；首次使用焊接式真空连接低温管路、多层绝热远控低温截止阀等技术，实现了低温系统性能的整体提升。

9) 月球科学探测、数据接收与研究技术

卫星上所配置的8种科学探测仪器所能完成的科学目标和探测任务与国际主流一致，且具有一定的特色。在国际上首次利用微波探测仪对月壤进行探测。

首次研制出国内口径最大的50 m和40 m天线接收

系统，攻克了距离40万 km以上数据接收的关键技术；国内首次攻克并建立了8种有效载荷探测数据的处理方法、流程和反演模型；国内首次建立了月球探测数据规范；集成研制出国内唯一可适用于月球科学探测卫星的集有效载荷在轨业务运行管理和探测数据接收与处理、融合与拼接、应用与研究等功能于一体的技术支撑系统。

2 “嫦娥2号”任务

2.1 任务概述

2008年，按照既定的“三步走”战略，探月工程二期立项并进入工程实施阶段，主要目标是实现在月面软着陆，开展月面就位探测与巡视勘察。二期工程包括“嫦娥2号”和“嫦娥3号”两次任务，其中，“嫦娥2号”为工程先导星，开展部分关键技术试验验证，包括直接奔月轨道、X频段测控、预选着陆区详察等，为“嫦娥3号”任务开展部分技术进行先期验证，同时深化月球科学探测，提高探测精度。

“嫦娥2号”任务的工程目标是：验证运载火箭直接将卫星发射至地月转移轨道的发射技术；试验X频段深空测控技术，初步验证深空测控体制；验证100 km月球轨道捕获技术和环月飞行技术；验证100 km×15 km轨道机动与快速测定轨技术；试验低密度校验码(LDPC)遥测信道编译码、高速数据传输、降落相机等技术；对“嫦娥3号”任务预选着陆区进行高分辨率成像试验，定量评估预选着陆区的地表特性，提高“嫦娥3号”任务着陆安全性。

“嫦娥2号”任务开展4类科学探测：获取高精度月球表面三维影像；探测月球物质成分；探测月壤特性；探测地月与近月空间环境。

2010年10月1日，“嫦娥2号”卫星由“长征3号丙”运载火箭在西昌卫星发射中心成功发射。10月6日，卫星准确进入了环月轨道。11月8日，工程第一张高分辨率虹湾局部影像图正式对外发布，“嫦娥2号”工程取得了圆满成功。

2.2 主要成就

“嫦娥2号”工程的成功实施，突破了一批核心和关键技术、取得了一系列重大科技创新成果，带动了我国空间技术、空间科学和空间应用的发展；进一步形成和积累了我国特色重大科技工程管理方式和经验；培养造就了高素质科技人才和管理人才队伍；检验了我国进入深空的能力，对深入开展深空探测活动、推进我国航天事业、建设先进国防科技工业具有重大意义。

“嫦娥2号”工程在以下7个方面取得了重大技术创

新:

1) 突破直接地月转移轨道发射和飞行技术

针对后续探月工程直接发射入轨精度要求高、发射窗口窄等难点,突破了多窗口滑行时间可变、高可靠零窗口发射和直奔月轨道设计等关键技术。火箭入轨精度达到国际先进水平。

2) 首次成功实现100 km×100 km和100 km×15 km环月飞行

针对月球不均匀重力场及高起伏地形环境,突破月球拟冻结轨道设计、卫星自主惯性对准、机动轨道拼接等关键技术,首次实现了月球背面大推力发动机点火变轨、距月面15 km近月探测。卫星轨道控制精度、轨道机动可靠性达到了国际先进水平。

3) 突破近月点15 km轨道短弧段、快速测定轨关键技术,建立具有自主知识产权的月球重力场模型

解决了测控数据融合、传播介质误差修正模型优化等高精度测量技术难题,并在国际上首次利用VLBI技术在30 min内获取精度优于1 mm/s、100 m的横向速度与位置信息,实现了卫星关键飞行弧段的快速、准确测定轨,达到了国际先进水平。通过高精度测定轨反演,建立了我国100阶月球重力场模型,优于国际精度最高的日本模型。

4) 国际上首次获得7 m分辨率全月球立体影像,并获得优于1.5 m的预选着陆区高分辨率立体影像

针对月球表面后向反射强、光照强度变化大、轨道预报精度要求高等难点,在国际月球探测中首次采用时间延时积分(TDI)成像技术,创新设计了由地面行频数据注入和测高数据辅助两种速高比补偿成像方法,获取的全月球影像图分辨率和覆盖率达到国际领先水平,预选着陆区局部影像图分辨率达到国际先进水平。

5) 首次验证X频段深空测控体制和相关技术

突破了S/X双频段地面测控设备和X频段数字化应答机研制、基于差分单向测距(DOR)音的干涉测量信号处理等难题,首次实现了X频段高精度测速测距(1 mm/s, 1 m)、7.812 5 bps极低码速率遥控。标志着我国航天测控由S频段向X频段深空测控体制的技术跨越,进入了国际先进水平行列,为后续探月工程和火星等行星际探测奠定了基础。

6) 首次实现地月空间飞行过程监视成像和低密度奇偶校验码(LDPC)遥测信道编译码

突破了高动态范围成像、多目标曝光策略选择、真实色彩还原等难点,实时获取了太阳翼展开、天线

展开/转动、主发动机点火等关键环节的动态图像,填补了国内空白,为后续探测器设计优化、重要飞行事件判断提供了可视化手段。首次在航天工程中实现LDPC编译码,主要指标优于国际(CCSDS)标准,提高了我国在国际深空信道编译码领域的地位和话语权。

7) 在国际上首次实现从月球轨道飞向日地拉格朗日L2点的拓展试验

在地、月、星及日、地、星双重三体环境下,突破从月球飞往拉格朗日L2点的轨道设计和飞行控制、8 000万 km远距离测控与通信等关键技术。开展对地球远磁尾三维离子能谱、太阳耀斑爆发和宇宙伽马爆的科学探测。以月球为中转,首次完成了月球轨道精细探测、拉格朗日L2点环绕探测和图塔蒂斯小行星飞越探测(如图2所示)等多目标和多任务探测。实现了我国航天飞行从40万 km到8 000万 km的跨越。

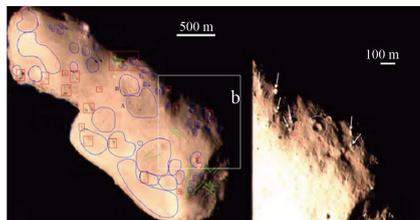


图2 “嫦娥2号”拍摄的小行星图塔蒂斯

Fig. 2 The Toutatis photo by the Chang'e-2

3 “嫦娥3号”任务

3.1 任务概述

“嫦娥3号”任务的工程目标是:突破月球软着陆、月面巡视勘察、深空测控通信与遥操作、深空探测运载火箭发射等关键技术,提升航天技术水平;研制月球软着陆探测器和巡视探测器,建立地面深空站,获得包括运载火箭、月球探测器、发射场、深空测控通信、地面应用等在内的功能模块,具备月球软着陆探测的基本能力;建立月球探测航天工程基本体系,形成重大项目实施的科学有效的工程方法。

“嫦娥3号”任务开展3类科学探测:月表形貌与地质构造调查;月表物质成分和可利用资源调查;日地月空间环境探测和月基光学天文观测。

2013年12月2日,“嫦娥3号”探测器由“长征3号乙”运载火箭在西昌卫星发射中心准时发射。探测器精确入轨、成功环月,12月14日“嫦娥3号”探测器安全着陆于虹湾预选着陆区,12月15日巡视器和着陆器可靠分离并完成互拍(如图3、4所示),首次实现了我国航天器地外天体软着陆与巡视勘察,开展了“测月、巡

天、观地”等探测，获得了大量科学数据，工程取得圆满成功。

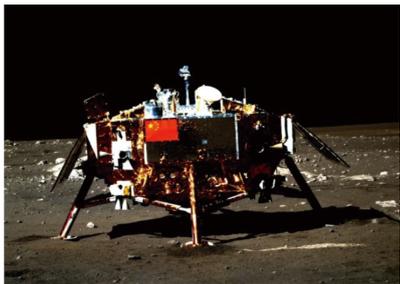


图3 “嫦娥3号”着陆器月面工作图

Fig. 3 The lander of the Chang'e-3 on the lunar surface

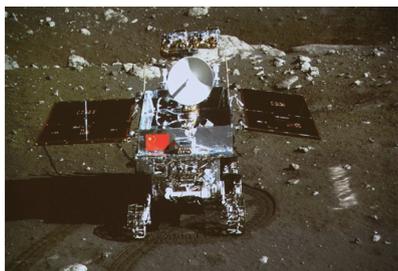


图4 “嫦娥3号”巡视器月面工作图

Fig. 4 The rover of the Chang'e-3 on the lunar surface

“嫦娥3号”工程的成功实施，实现了我国航天的多个“第一”：实现了地外天体软着陆；实现了地外天体巡视勘察；在航天器上采用放射性同位素热源和两相流体回路技术，实现了探测器在极低温度环境下生存；试验验证了运载火箭低温加注后连接器不脱落推迟24 h发射的能力；研制了我国大型深空站，初步建成覆盖行星际航行的深空测控通信网；实现了在月面同时开展就位与巡视综合科学探测；形成了一批先进的月球探测试验方法和特种试验设施。这些成绩的取得，为后续月球及深空探测奠定了坚实的基础。

“嫦娥3号”任务的成功实施使我国成为继苏联、美国之后第3个实施月球软着陆的国家。其中，苏联为实现月球软着陆在经历了11次着陆失败后，才成功实现了“月球9号”的首次月面半软着陆。美国则经历2次着陆失败后，才成功实施了“勘察者1号”软着陆。“嫦娥3号”作为我国首个月球软着陆探测器，在世界探月史上，首次同时实现了着陆器就位探测和巡视器月面巡视勘察。

3.2 主要成就

“嫦娥3号”工程是我国航天领域迄今技术挑战最大、工程风险最高的空间活动之一。“嫦娥3号”工程的圆满成功，标志着我国探月工程“绕、落、回”三步走的第二步战略目标全面实现，是我国航天事业发展又

一新的里程碑。整个工程的实施，以较小的经济投入，仅用6年左右的时间，突破了多项月球与深空探测关键技术，进一步完善了我国月球探测工程体系，实现了我国航天技术发展和空间科学研究的重大跨越，使我国跨入了国际月球探测领域的先进行列，社会效益显著，并具有广泛的经济和军事潜在效益。

“嫦娥3号”工程在以下7个方面取得了重大技术创新：

1) 首次实现全自主避障的月球软着陆

突破了总体设计、月面着陆、两器分离、月夜生存等关键技术；提出了路径优、燃料省、误差小、避障能力强的全自主软着陆控制方法；发明了高效吸能的“四腿式”着陆缓冲机构；研制了高比冲大推力连续可调的主发动机、重量轻无晃动的新型金属膜片贮箱推进控制系统^[2]。

2) 首次实现我国航天器在地外天体巡视探测

提出了六轮摇臂悬架、机构功能复用的全新巡视器构形方案，突破了非规划环境下的月面巡视导航、月面移动、遥操作等关键技术，成功研制了我国首个月面集自主导航、巡视探测、科学分析于一体的巡视器。

3) 提出了同位素热源结合低重力驱动两相流体回路技术的月夜生存和光照自主唤醒方案

突破了低重力驱动两相流体回路和涉核产品在严酷条件下的测试、试验、验证等关键技术，实现了热能自主可控传输、仪器设备在极低温环境下的月夜生存和自主感知太阳光照的可靠唤醒。

4) 突破了我国低温推进剂火箭多窗口、窄宽度发射技术和地月转移轨道高精度入轨技术

解决了运载火箭多窗口发射及低温推进剂加注后可推迟24 h发射等难题，增强了运载火箭应对复杂发射任务的适应能力；采用双激光惯组/卫星导航复合制导技术，使轨道半长轴偏差由万公里级提高到百公里级。

5) 首次成功研制了我国大型深空测控站，建成了可开展行星际空间活动的深空测控通信网

突破了大口径高效率天线（如图5所示）、超低温制冷接收机、高精度高稳定度氢原子钟、多频段大功率发射机等关键技术，研制了35 m、66 m口径深空测控站和65 m口径射电望远镜；突破了三向测量、差分单向测距、同波束干涉测量等关键技术，实现了高精度、快速测定轨和月面定位。测距误差达米级，测速误差达毫米/秒级，月面相对定位误差达厘米级。

6) 首次实现我国月面就位和巡视探测，同时完成“测月、巡天、观地”



图5 深空站测控天线

Fig. 5 The antenna of deep space station

首次进行月基光学天文观测, 获得了天体光变曲线和巡天观测图像; 首次在月面上进行对地球空间等离子体层的极紫外定点、大视域成像, 获取了磁暴发生后等离子体再填充的宝贵原始数据; 首次获得了月壳浅层结构和月壤厚度、着陆区域精细地形地貌、着陆点附近元素和物质成分, 为月球区域构造动力学的研究提供第一手数据。

7) 首次研制了一系列高水平特种试验设施, 形成了一系列先进试验方法、规范和标准

突破了着陆冲击、悬停避障、巡视器自主导航等试验验证关键技术, 成功研制了月面着陆悬停避障/冲击/导航控制试验场、巡视器内场和外场、2万 N 发动机高模试车台等大型、特种试验设施, 形成了悬停自主避障、着陆缓冲和可靠性安全性设计等一系列先进试验方法、设计规范与试验标准。不仅有效支撑了工程的顺利实施, 而且为后续月球与深空探测任务奠定技术基础^[3]。

4 “嫦娥5号”高速再入试验任务

4.1 任务概述

2009年, 在开展我国探月二期工程实施的同时, 为有机衔接探月工程一、二期, 兼顾未来载人登月和深空探测发展, 我国正式启动了探月三期工程, 即“嫦娥5号”任务的方案论证和预先研究。三期工程于2011年正式立项, 任务目标是实现月面无人采样返回, 计划于2017年择机发射。为了降低工程风险, 规划了月地高速再入返回任务用于验证半弹道跳跃式再入的关键技术。

月地高速再入返回任务的工程目标是: 验证返回器气动与热防护、再入GNC、轻小型回收等关键技术, 确保返回器技术方案的可行性和正确性, 为探月三期正式任务的顺利实施打下基础。

2014年10月24日, 月地高速再入返回飞行器在西

昌卫星发射中心用“长征3号丙”运载火箭发射升空, 准确进入近地点高度为209 km、远地点高度41.3万 km 的地月转移轨道。10月28日, 月地高速再入返回飞行器完成月球近旁转向飞行, 离开月球引力影响球, 进入月地转移轨道。11月1日, 月地高速再入返回飞行器在内蒙古四子王旗预定区域顺利着陆, 任务获得圆满成功。

4.2 技术成就

探月三期月地高速再入返回任务设计约束条件多、任务模式多、技术难度大、复杂程度高、新研产品多, 此次任务的圆满成功, 表明我国已经全面突破和掌握了高速再入返回技术, 为探月三期“嫦娥5号”任务的顺利实施奠定了坚实的技术基础。研制过程中取得了一批具有自主知识产权的创新科研成果, 这些成果可用于载人登月和行星际探测任务, 有力地促进了深空探测领域航天技术的发展, 同时带动了其他相关学科和领域的技术进步, 推动了我国科技自主创新能力的提升^[4]。

探月三期月地高速再入返回任务在以下6个方面取得了重大技术创新:

- 1) 构建了月地高速再入返回工程体系, 实现了国际上最高精度的第二宇宙速度安全返回;
- 2) 构建了双平台飞行器系统, 实现了国际上首次月地多次往返和多目标探测;
- 3) 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, 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;
- 4) 突破了高速再入返回气动设计与验证技术, 全面提升了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;
- 5) 突破了高速两次再入大气层热防护技术, 其中, 烧蚀材料的密度处于国际领先水平;
- 6) 突破了半弹道跳跃式再入返回自主制导导航与控制技术, 实现了国际上首次小升阻比返回器高精度返回。

5 后续展望

月球是距离地球最近的天体, 以其独特的空间位置、广阔的科学探索前景, 成为人类地外天体探测和资源利用的首选目标。在我国已有探月工程的基础上, 实施月球探测后续任务, 符合持续发展规律。总体上, 后续任务应以月球科学探测和月球资源利用为牵引, 同时与深空探测技术验证相结合^[5]。

月球后续任务将通过多种探测手段、多次任务实

施,在科学上,开展月球背面及极区地质特征和演化历史研究,月面环境综合效应研究,以水冰为代表的月球资源详查,进行月基天文观测与对地监测;在工程上,突破全月面到达、高数据率地月通信、大区域智能机器人、全周期能源供给、先进探测载荷等关键技术,形成全周期、复杂环境条件下的机器人月球探测能力,开展资源利用技术验证。为未来载人登月和月球科学考察站建设起到承前启后、技术探索与验证的重要作用。

月球后续任务的第一步已经明确,即“嫦娥4号”任务。计划在2018年左右,实现人类首次软着陆于月球背面并开展巡视探测。

“嫦娥4号”任务的工程目标是:实现人类首次月球背面软着陆和巡视勘察;实现首次地月拉格朗日L2点中继星对地对月的测控、数传中继。

“嫦娥4号”任务将开展3类科学探测:低频射电天文观测与研究;着陆区地质特征探测与研究;月球背面月表环境探测与研究。

着陆到月球背面进行就位探测,一直是各国开展月球探测的重要目标之一,但至今还没有实现。其中一个主要的原因就是着陆到背面,面临着更大的技术挑战。相比于着陆到月球正面,主要技术难点体现在以下3个方面:

1) 复杂地形条件下的着陆

“嫦娥3号”任务的着陆区选择在地势较为平坦的虹湾地区;而月球背面地形地貌以高地为主,地势相对崎岖。为了保证着陆的安全,一方面需要通过优化引导、导航和控制策略,来提供对复杂地形的适应能力;另一方面,需要通过精细化的轨道设计与控制,缩小着陆点散布,以保证着陆的安全。

2) 中继通信

在月球背面,着陆器、巡视器无法直接同地球通信,必须采用卫星中继的方式。中继卫星的轨道选择、中继模式的选择等对任务实施的风险有很大影响,需要综合优化。同时,任务环节增加,使地面操作更加复杂,任务风险增大。

3) RTG热电综合利用

为实现月夜采集月壤温度的工程目标,需要研制同位素温差电源(RTG)提供月夜电能的供给。同时,RTG产生的衰变热需要引入舱内为设备提供热源,以应对月面上月夜的极低温度环境。RTG的设计与验证、热电综合有效利用等技术,都是面临的全新挑战。

“嫦娥4号”探测器将研制着陆器、巡视器和中继

星,突破地月系L2平动点轨道精确设计与控制、地-月-L2点远距离数据中继、复杂地形环境条件下的高精度着陆、同位素温差发电和月夜工作等关键技术,实现人类首次在月球背面软着陆并开展探测活动,深化和拓展我国月球探测技术,为月球后续任务可靠实施奠定基础。

6 结束语

我国已成功实施了“嫦娥1号”“嫦娥2号”“嫦娥3号”“嫦娥5号”再入返回试验4次任务。这些任务的圆满实现,标志我国已掌握了月球探测的多项关键技术,获得了大量科学成果,建立了较为完善的工程体系,具备了月球到达、月面着陆等基本能力。总体看,我国的探月工程起步晚但起点高,任务次数少但涵盖内容多,投入少但产出多^[6],整体能力快速发展,迅速跻身于国际月球探测先进行列。

但也应清醒地认识到,对于月球探测,我国在探测手段、探测深度和广度,以及关键技术储备方面,同世界航天强国相比还存在一定差距。结合国外发展趋势和我国实际情况,我国月球探测后续任务应以“常态化、规模适度”为基本发展原则,通过持续开展月球探测,不断深化月球科学研究和新技术验证,逐步实现空间技术向空间科学和空间应用拓展,为后续月球资源开发利用、行星际深空探测和载人登月奠定坚实的技术基础。

参 考 文 献

- [1] 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]. Sci Sin Tech, 2014, 44(6): 543-558.
- [2] 孙泽洲,张廷新,张焯,等.“嫦娥3号”探测器的技术与成就[J].中国科学:技术科学,2014,44(4):331-343.
Sun Z Z, Zhang T X, Zhang H, et al. The technical design and achievements of Chang'E-3 probe [J]. Sci Sin Tech, 2014, 44(4): 331-343.
- [3] 吴伟仁,于登云.嫦娥三号月球软着陆工程中的关键技术[J].深空探测学报,2014,1(2):105-109.
Wu W R, Yu D Y. Key technologies in the Chang'e-3 soft-landing project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(2): 105-109.
- [4] 杨孟飞,张高,张伍,等.探月三期月地高速再入返回飞行器技术与实现[J].中国科学:技术科学,2015,45(2):111-123.
Yang M F, Zhang G, Zhang W, et al. Technique design and realization of the circumlunar return and reentry spacecraft of 3rd phase of Chinese lunar exploration program[J]. Sci Sin Tech, 2015, 45(2): 111-123.

- [5] 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.
Wu W R, Yu D Y, Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.
- [6] 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.

作者简介:

于登云(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国航天科技集团公司科技委副主任, 中国探月工程副总设计师。主要研究方向: 航天器动力学与总体设计技术。

通信地址: 北京市海淀区阜成路16号航天科技大厦(100048)

电话: (010) 68370292

E-mail: yudyun@sina.com.cn

吴伟仁(1953-), 男, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 国防科工局探月与航天工程中心, 中国探月工程总设计师。主要研究方向: 航天测控通信与航天系统总体设计。

通信地址: 北京市西城区车公庄大街12号10层(100037)

电话: (010) 88306176

E-mail: wuw2002@rip.sina.com.cn

吴学英(1972-), 男, 研究员, 硕士生导师, “嫦娥4号”探测器总师助理。主要研究方向: 航天器测控通信与总体设计技术。本文通讯作者。

通信地址: 北京市5142信箱373分箱(100094)

电话: (010) 68746876

E-mail: wuxueying@sohu.com

Review of Technology Development for Chinese Lunar Exploration Program

YU Dengyun¹, WU Xueying³, WU Weiren²

(1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

2. Lunar Exploration and Space Program Center, Beijing 100037, China;

3. Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Before the year of 2020, the Chinese Lunar Exploration Program will be implemented in three steps of “Orbiting the Moon, Landing the Moon and Returning from the Moon”. This paper shows that the engineering and scientific goal, implementation result and the major technical achievement for the Chang’e-1, Chang’e-2, Chang’e-3 and Chang’e-5 Circumlunar Return and Reentry missions. After that, this paper gives the developing trends of Lunar Exploration Program and system ideas and framework of the future lunar missions.

Key words: Lunar Exploration Program; technical achievement; expectation

[责任编辑: 宋宏]