中国科学: 技术科学 2025 年 第 55 卷 第 7 期: 1133 ~ 1146
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

嫦娥六号探测器月背无人自动采样返回任务技术设计与实现

杨孟飞[1], 张高[2], 张伍[2], 阮剑华[2], 黄昊[2], 彭兢[2], 邓湘金[2], 史伟[2], 王勇[3], 张洪华[3], 洪鑫[4], 张玉花[5], 查学雷[5], 李天义[5], 白崇延[2*]

1. 中国空间技术研究院, 北京 100094
2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094
3. 北京控制工程研究所, 北京 100080
4. 上海空间推进研究所, 上海 201112
5. 上海航天技术研究院, 上海 201109
* E-mail: baicy141319@qq.com

收稿日期: 2024-11-11; 接受日期: 2025-03-17; 网络版发表日期: 2025-05-21
国家中长期科技发展规划重大专项工程资助项目

摘要 探月四期嫦娥六号任务是我国首次月球背面采样返回任务, 研制目的是经过地月转移和环月飞行, 在月背选定区域着陆,在中继星支持下完成月背月球样品采集, 经自主月面起飞、月球轨道交会对接与样品转移、月地转移和再入回收等过程, 将月球样品安全送至地面. 本文阐述了嫦娥六号的任务特点、概貌和研制过程, 重点对探测器系统级设计进行了总结, 并给出了在轨飞行结果. 结果表明, 嫦娥六号探测器所有功能性能均满足任务要求, 在轨飞行状态正常, 技术设计正确.

关键词 探月四期, 嫦娥六号, 月球背面, 采样返回, 飞行结果

1 引言

我国探月工程“绕、落、回”三步走圆满收官后, 中国将发射嫦娥六号探测器, 完成月背采样返回任务[1]. 2024年5月3日, 嫦娥六号探测器成功发射, 经历约53天的在轨飞行后, 于2024年6月25日, 携带月球样品在内蒙古四子王旗地区着陆, 嫦娥六号任务取得圆满成功. 嫦娥六号在人类历史上首次实现了月背样品采样返回, 创造了人类探月的新高度.

嫦娥六号探测器由轨道器、返回器、着陆器和上升器四器组成, 并搭载了4台国际载荷和1台月面自主智能微小机器人(金鳍号). 探测器由长征五号运载火箭在文昌航天发射中心发射, 经过发射入轨段、地月转移段、近月制动段、环月飞行段、着陆下降段、月面工作段、月面上升段、交会对接与样品转移段、环月等待段、月地转移段和再入回收段等飞行阶段, 实现在月球背面南极-艾特肯盆地(简称SPA盆地)采样并将月球样品安全送至地面.

引用格式: 杨孟飞, 张高, 张伍, 等. 嫦娥六号探测器月背无人自动采样返回任务技术设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 1133–1146
Yang M F, Zhang G, Zhang W, et al. Technical design and implementation of Chang'e-6 robotic sample return mission on the far side of the moon (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 1133–1146, doi: 10.1360/SST-2024-0287

© 2025 《中国科学》杂志社

本文对嫦娥六号的任务特点、概貌和研制过程进行了介绍, 重点对探测器系统设计情况和创新进行了总结,并给出了在轨飞行结果.

2 探月四期嫦娥六号任务特点

嫦娥六号月球背面采样返回任务, 除了具有任务工作模式复杂、关键环节难度大、系统资源受限等特点外[2~5], 本次月背采样返回任务还具有以下特点.

(1) 总体设计难度大. 在产品技术状态基本确定的情况下, 嫦娥六号探测器既要适应新的任务, 又要考虑现有产品状态, 约束条件更加苛刻; 月背采样返回任务适应性设计及国际载荷搭载需求, 将改变已有的探测器构型布局和电气接口等内容, 对技术状态产生较大的影响, 适配设计难度大.

(2) 月背表面环境认识不充分, 采样风险大. 嫦娥六号采样区位于月球背面SPA盆地内, 其中撞击坑较大且分布密集, 地势比较崎岖, 仅在大型的撞击坑底部以及部分月海地区存在相对较平坦的区域. 另外, 人类尚未实施过月球背面采样活动, 对月球背面风化层月壤地质特性的认识还不充分, 安全着陆和采样活动风险大.

(3) 月背通信需中继转发, 测控约束强, 自主能力要求高. 探测器月背对地通信需通过中继星转发, 中继星在环月倾斜大椭圆冻结轨道绕月运行, 中继星相对探测器空间方位变化大, 同时存在中继星与着陆器不可见弧段, 通信不连续, 通信时长少的问题. 对月背起飞上升可靠性保障和探测器月面工作效率提出了新挑战, 必须进一步强化探测器自主能力设计. 为确保月面工作中继星在可见弧段内, 着陆上升组合体能够与中继星可靠建立中继通信链路, 对着陆上升组合体测控、数传天线的覆盖范围以及数传天线的跟踪能力均提出了新的要求.

(4) 设备经历长期贮存, 产品保证难度大. 嫦娥六号大量产品已于2016~2017年完成投产工作. 按照发射计划, 相关产品经历了约8年的贮存期, 部分产品存在寿命超期情况, 产品贮存和寿命保证难度大.

(5) 开展国际合作, 安全性要求高. 根据任务要求, 拟在着陆器上搭载3台国际载荷, 在轨道器上搭载1台国际载荷. 为确保搭载设备可靠工作且不对主任务产生影响, 对服务于搭载设备的电气和信息接口安全性以及在轨分离安全性设计要求高.

3 嫦娥六号探测器简介

嫦娥六号探测器由轨道器、返回器、着陆器和上升器组成, 包括结构分系统、机构分系统、测控数传分系统、天线分系统、数管分系统、供配电分系统、热控分系统、采样封装分系统、工程参数测量分系统、GNC分系统、推进分系统、回收分系统、对接机构与样品转移分系统、分离机构分系统、有效载荷分系统, 搭载氡气探测仪(法国)、月表负离子分析仪(欧空局/瑞典)、激光角反射器(意大利)、立方星(巴基斯坦) 4台国际载荷以及月面自主智能微小机器人(金蟾号), 相关搭载产品如图1所示. 嫦娥六号探测器主要技术指标见表1.

4 嫦娥六号探测器任务过程分析

嫦娥六号采用长征五号运载火箭直接发射到近地点约200 km、远地点高度约380000 km地月转移轨道. 嫦娥六号飞行阶段包括发射入轨段、地月转移段、近月制动段、环月飞行段、着陆下降段、月面工作段、月面上升段、交会对接与样品转移段、环月等待段、月地转移段和再入回收段等11个飞行阶段, 与嫦娥五号相比, 任务过程变化主要是由于采样区位置从月球正面北纬中纬度地区调整至月球背面南极-艾特坑区域带来的近月制动次数、环月飞行时长、月背通信方式等相关变化[6].

4.1 飞行过程时长分析

为了实现月面无人自动采样返回任务, 受月球轨道交会对接任务的约束, 捕获时刻和入射时刻的间隔时间近似为半个恒星月(1个恒星月约27.3天)的整数倍.

此外, 为了满足航程约束的要求, 近月制动时刻需在月球处于最北纬附近, 月地入射时刻在月球处于最南纬附近, 进一步限制了捕获时刻和入射时刻需要为半个月、1个半月, 依此类推.

同时, 受运载发射重量的限制, 地月和月地转移轨道均选择了转移时间5天左右的入射能量最优轨道.

因此, 要实现我国月面无人自动采样返回任务, 总

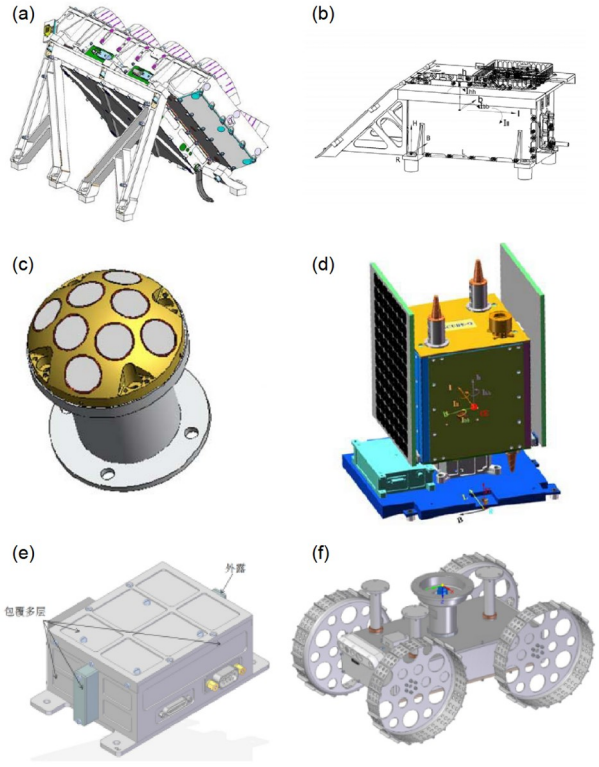


图 1　(网络版彩图)搭载设备示意图. (a) 氡气探测仪; (b) 负离子分析仪; (c) 激光角反射器; (d) 立方星; (e) 月面自主智能微小机器人

Figure 1　(Color online) Carrying equipment of Chang'e-6. (a) Detection of out-gassing radon (DORN) instrument; (b) negative ions on the lunar surface (NILS) instrument; (c) laser reflector; (d) ICUBE-Q CubeSat; (e) autonomous intelligent microrobot on the Moon.

表 1　嫦娥六号探测器主要技术指标

Table 1　Technical specifications of Chang'e-6 probe

序号	项目	指标要求
1	发射质量	≤8300 kg
2	发射收拢状态包络	≤Φ4500 mm × 7200 mm
3	月面工作时间	约2天
4	获取样品总质量	约2 kg
5	月面采样区域	纬度: 41°S~45°S 经度: 136°E~120°W
6	返回着陆速度	垂直着陆速度≤13 m/s
7	返回落点范围	四子王旗, 航向±95 km、横向±55 km

的飞行时长T大致估算为

$$T = 10 + (N + 1/2) \times 27.3,$$

其中, $N = 0, 1, 2,\cdots$

飞行时长示意如图2所示.

嫦娥六号任务采样区域的经度位于西经154°±4°, 为了实现动力下降时刻和起飞上升时刻, 采样点能够与轨返组合体环月轨道共面, 需要通过增加环月等待时间来满足要求, 因此采用一个半月的环月飞行方案, 全任务周期约为53天.

4.2　近月制动段

嫦娥六号落点经度范围仅有±4°, 远小于嫦娥五号任务±10°的采样区经度范围. 考虑到推进剂约束, 为了确保更多的发射机会更精确地到达采样区, 需采用三脉冲近月制动方案.

探测器通过两次近月制动首先进入一个周期约4 h的环月小椭圆轨道, 利用不同周期轨道的升交点摄动差异, 合理选择第三次近月制动进入周期约2 h的200 km环月圆轨道的时机, 从而调整落点经度, 结合探测器3°的非共面调整能力, 使探测器进入预定采样区范围.

4.3　环月飞行段

环月飞行时间约一个半月, 由于环月飞行期间探测器处于对日巡航飞行状态, 长时间环月飞行主要影响包括以下方面:

(1) 环月轨道探测器重力梯度效应影响明显, 需要考虑一定的推进剂消耗;

(2) 为尽早确认月背中继通信链路可用性, 需要在探测器环月飞行阶段增加与中继星中继链路对通测试.

4.4　着陆下降段

动力下降过程由于制动时间短、速度变化大, 地面无法实时操控探测器动力下降过程, 因此嫦娥六号需要具备自主着陆功能, 主要是基于惯性导航敏感器和相对测量敏感器(如微波/激光测速、测距敏感器), 在推进等分系统配合下, 实现自主动力下降导航、制导与控制, 并具有一定的地形识别和自主避障能力. 相比嫦娥五号, 嫦娥六号在动力下降过程中, 地面测站不可视, 需要中继星指向着陆上升组合体, 建立前返向中继链路, 作为备保控制手段, 开展对动力下降过程的遥测监视及可能的应急控制.

动力下降段降落相机图像仅用于降落过程记录, 不用于探测器着陆过程控制, 设计上可在落月后通过

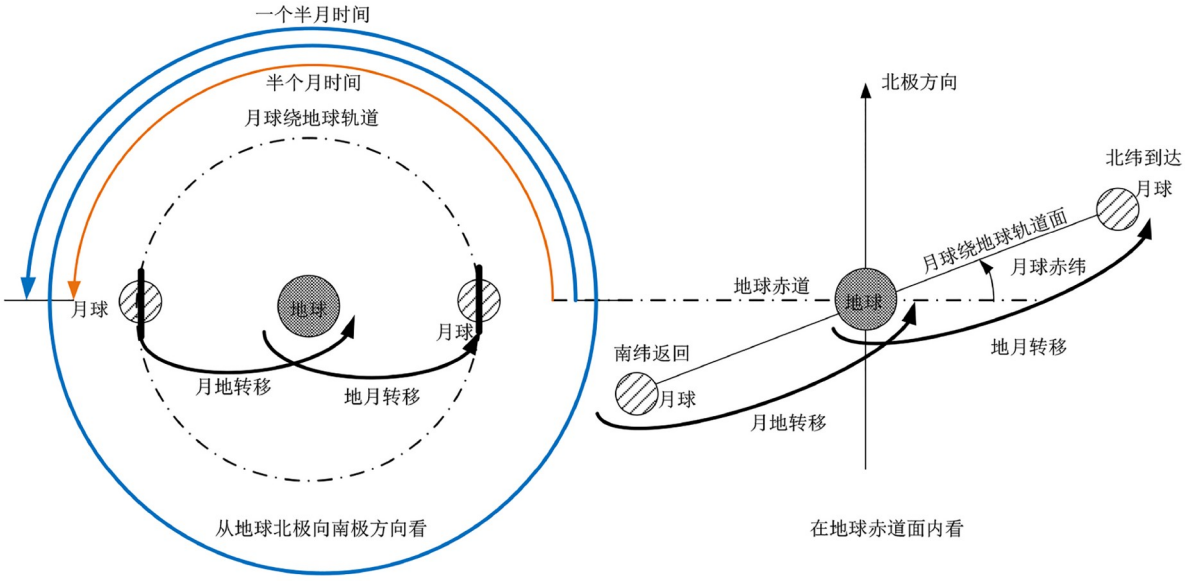


图 2 (网络版彩图)飞行时序示意图
Figure 2 (Color online) Flight process of Chang'e-6 probe.

定向天线, 由中继星转发至地面.

4.5 月面工作段

月面工作段重点需要关注的是由于着陆月背之后, 中继星引入带来的变化影响.

(1) 落月初始化需求

嫦娥六号任务需在中继星的支持下, 完成落月后初始状态设置, 同时, 考虑落月过程复杂, 可能存在中继通信建链过程时间长的问题, 探测器需具备落月后自主设置初始状态能力.

(2) 月面工作效率提升与自主采样需求

根据中继星轨道设计结果, 月面工作期间中继星对着陆上升组合体的测控时长约为18 h. 着陆上升组合体月面工作2天时间内, 对中继星的测控可用时长约为36 h, 较嫦娥五号测控可用时长减小约12 h. 因此, 需要提高嫦娥六号着陆上升组合体的月面工作效率.

嫦娥五号任务中, 钻取及表取采样和月面起飞准备占据了月面工作的绝大部分时间, 上行指令数达上千条, 需对采样过程开展效率提升设计, 满足月背样品采集需求. 另外, 为确保嫦娥六号能够可靠获取月背样品, 考虑中继通信可能间断的故障情形, 探测器需具备一定的自主采样能力. 嫦娥六号在12 h的非中继测控弧段内安排部分载荷实施科学探测, 探测数据存储在着陆器DIU中, 并在中继测控弧段内安排载荷数据下传, 满足载荷探测时间需求.

(3) 定位需求

嫦娥六号任务中, 通过地面测控系统完成地月转移、近月制动、环月飞行、月地转移过程的定轨任务. 探测器在月背月面工作期间, 地面无法直接通过无线电测量的方式进行定位. 为了满足上升器月面起飞的需求, 需要采用其他定位方式. 为此, 嫦娥六号任务落月后采用以上升器GNC自主定位为主、地面图像匹配定位为辅的定位方式.

(4) 全向测控需求

根据中继星轨道分析, 嫦娥六号着陆上升组合体落月后, 在可见弧段内, 中继星在着陆点上半空间可见弧段内, 大部分时间出现在着陆上升组合体+Yzp侧(上升器+Zp侧), 为确保月面着陆上升组合体前向遥控接收可靠性, 在上升器+X方向布设X频段接收天线A2(备份接收天线), 进而实现月面工作期间对X频段接收天线A1和B的备份.

(5) 定向数传需求

着陆器定向天线对中继星指向需要覆盖着陆点当地参考平面的上半球空间. 为确保探测器与中继星配合完成嫦娥六号月球背面采样任务, 需嫦娥六号着陆器采用两套定向天线, 保证月面工作阶段着陆器定向

天线1/2球空间均可以与中继星进行数据传输.

4.6　月面上升段

月面起飞准备期间，需完成起飞上升所需的指令和数据注入上注. 月面上升过程基于器上惯性导航敏感器，GNC与推进分系统配合自主实现起飞上升过程的导航制导与控制. 嫦娥六号在该过程中，仅能通过中继星开展地面测控操作，为确保嫦娥六号能够可靠起飞上升，考虑中继通信可能间断的故障情形，探测器需具备自主起飞上升的能力.

在起飞上升准备过程中，以探测器自主执行起飞上升为主，通过中继链路的测控支持为辅，地面通过中继通信链路，实现对起飞准备与上升过程的遥测监视及可能的应急控制.

4.7　科学载荷任务分析

嫦娥六号探测器的科学目标为: (1)月球背面着陆区的现场调查和分析; (2)月球背面样品的分析与研究.

为开展月球背面着陆区的现场调查与分析，完成月表形貌与地质构造调查、月表物质成分与资源勘察、月球浅层内部构造等科学探测工作，探测器配置了降落相机、全景相机、月球矿物光谱分析仪以及月壤结构探测仪. 另外，通过月面国旗展示系统、全景相机所获取的样品采集区域月面图像、月壤结构探测仪所获取的月壤结构等信息为月面采样工作提供支持.

4.8　搭载任务分析

2019年4月, 国家航天局对外发布了《嫦娥六号任务国际载荷搭载合作机遇公告》, 在公告中指出“计划利用嫦娥六号任务, 在以采样返回为主任务的同时, 探索更多国际合作模式和项目，以达到提升水平、共享成果、合作共赢的目标，为空间探测创造平台，为科学探索贡献智慧.” 最终确定嫦娥六号任务配置4项国际载荷搭载，分别是氡气探测仪(DORN)、月表负离子分析仪(NILS)、激光角反射器(INRRI)、立方星(ICUBE-Q). 根据各国际载荷任务需求, 氡气探测仪、月表负离子分析仪、激光角反射器等载荷搭载在着陆器上; 立方星搭载在轨道器上. 在国际载荷搭载设计上需重点考虑分离、供配电等方面的安全性，以及机、电、热接口的匹配性.

搭载了月面自主智能微小机器人，集成了中华人民共和国科学技术部重大项目“地外探测无人系统自主智能精准感知与操控”研究成果, 开展在轨验证与应用，实现月面地形感知、自身定位定姿、任务及路径规划、安全运动控制，并与着陆器进行无线通信，进行图像和数据传输. 在设计上，尽量减少与探测器复杂接口, 在不影响主任务的前提下开展新技术验证.

5　嫦娥六号探测器研制过程

嫦娥六号任务目标为实现月球背面自动采样返回, 并开展月球样品的地面分析研究.

2022年9月，探测器完成了正样设计并通过评审，转入正样研制阶段，至2023年12月按技术流程完成了探测器出厂前的全部研制工作. 正样研制过程中，各分系统完成了产品长期贮存、寿命评估及超期产品处置工作, 完成了产品研制、交付、复查及设计复核; 完成了探测器系统总装、电性能综合测试、EMC试验、力学试验、热试验、搭载设备测试等工作; 完成了与中继星对接试验，完成了与地面测控、地面应用、运载火箭系统的对接试验, 完成了器地1:1无线联合飞行试验，对探测器器上产品功能性能进行了充分的测试和验证. 2023年12月，嫦娥六号探测器系统通过了出厂评审.

2024年1月8日~9日探测器空运至海南文昌发射场, 先后完成了飞行前的总装、测试和推进剂加注, 完成了与长征五号运载火箭对接及发射程序联合演练等工作，嫦娥六号探测器于2024年5月3日成功发射入轨, 2024年6月25日, 返回器携带月背样品成功着陆内蒙古四子王旗着陆场.

6　嫦娥六号探测器系统设计

嫦娥六号探测器任务目标为实现月球背面自动采样返回, 着陆区域为月球背面SPA盆地. 探测器月球背面工作与地面通信需要中继星提供中继通信服务，同时嫦娥六号需要完成国际载荷搭载任务.

为适应新的环境变化, 满足新的任务需求, 探测器系统在轨道设计、月背采样、月背着陆/起飞上升、中继通信以及载荷搭载等方面开展了系统设计与验证工作.

6.1 轨道设计

嫦娥六号任务的环月轨道设计采用月球逆行轨道方案, 完成了2024~2025年月球赤纬增大带来的地月转移轨道、月地返回轨道关键参数调整等工作, 确保嫦娥六号轨道设计满足任务要求.

为了实现月背采样返回任务目标, 同时考虑尽量减少对已研制产品技术状态调整, 在轨道设计方面主要采取了以下措施[7,8].

(1) 设计了逆行环月轨道方案, 通过调整捕获方向和飞行方向, 解决了着陆上升组合体因采样点位置变化导致的对日面变化难题, 确保系统技术状态变化最小; 顺、逆行轨道动力下降飞行过程姿态调整情况如图3所示.

(2) 采用了基于进动速率差的环月轨道面外参数被动控制方法, 通过调整轨道面内参数实现了对轨道面外参数的精确控制, 解决了推进剂强约束下的高精度轨道控制问题.

(3) 设计了兼顾着陆月球背面与月球正面的飞行轨道方案. 针对中继星在动力下降前发生故障的情况, 设计了应急着陆月球正面的飞行轨道方案, 该方案通过采用第一个月发射窗口发射和第二个月返回窗口返回的组合方法, 可以同时兼顾着陆月球背面预定着陆区和着陆月球正面应急着陆区两方面的要求, 从而提高了任务实施的可靠性.

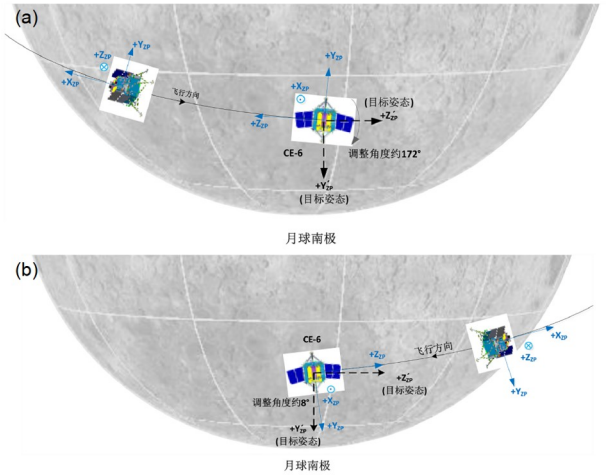


图 3 (网络版彩图)嫦娥六号(a)顺行和(b)逆行轨道动力下降飞行过程姿态调整示意图

Figure 3 (Color online) Illustration of landing attitude (a) using prograde lunar orbit and (b) using retrograde lunar orbit.

6.2 月背采样设计

着陆上升组合体月面有效工作时间较嫦娥五号减少约12 h[9], 需提升采样的自主化程度, 提高获取月球样品的效率.

6.2.1 表取序列化设计

嫦娥六号探测器设计了若干可单独工作的程序序列, 整个表取采样过程可以通过相应序列及其组合, 实现初始设置、样品采集、放样及观测、抓罐与放罐、避让断电等表取采样全部环节, 采样序列组合如图4所示. 序列执行过程中, 实现机械臂/采样器/初级封装的运动与机械臂相机/监视相机拍照有序工作, 自动根据遥测对机构状态、运动时间、目标位置、相机工作情况进行判读, 确保序列工作可靠安全. 如果序列工作期间, 判读条件不符合预期, 序列自动暂停, 转而由地面处置与决策. 序列执行中的采样、放样、抓罐、放罐等复杂操作, 需由地面辅助处置与决策, 确保工作过程安全.

6.2.2 钻取采样优化设计

钻取采样前对月壤形貌、月壤结构探测仪测量结果进行分析, 选择月壤或月岩钻进策略, 并设置相应的初始参数. 考虑到嫦娥六号钻取采样时间约束更强, 地面对钻取各子过程进行时间预设, 并通过人在回路进行适当的调控.

利用钻取自适应规程控制机构执行相关工作内容, 当触发回转电流超限、拉力超限、提芯力超限等情况时采样暂停, 切换为人工进行处置; 同时, 钻取采样过程中存在部分工况不会立即触发保护条件, 但呈现一定的趋势性变化, 此时人在回路中表现为人/机器辅助及时识别趋势并进行预判, 制定具体的操控指令介入钻取采样过程. 嫦娥六号任务利用采样任务支持软件融合地面试验经验知识, 识别趋势变化并生成调整策略.

6.2.3 应急自主采样设计

针对落月后中继通信不可用的故障情况, 为了争取获取一定的月球样品, 设计了应急钻取序列, 采用了以下策略:

(1) 降低拉力阈值, 调整拉力极限, 确保无地面支

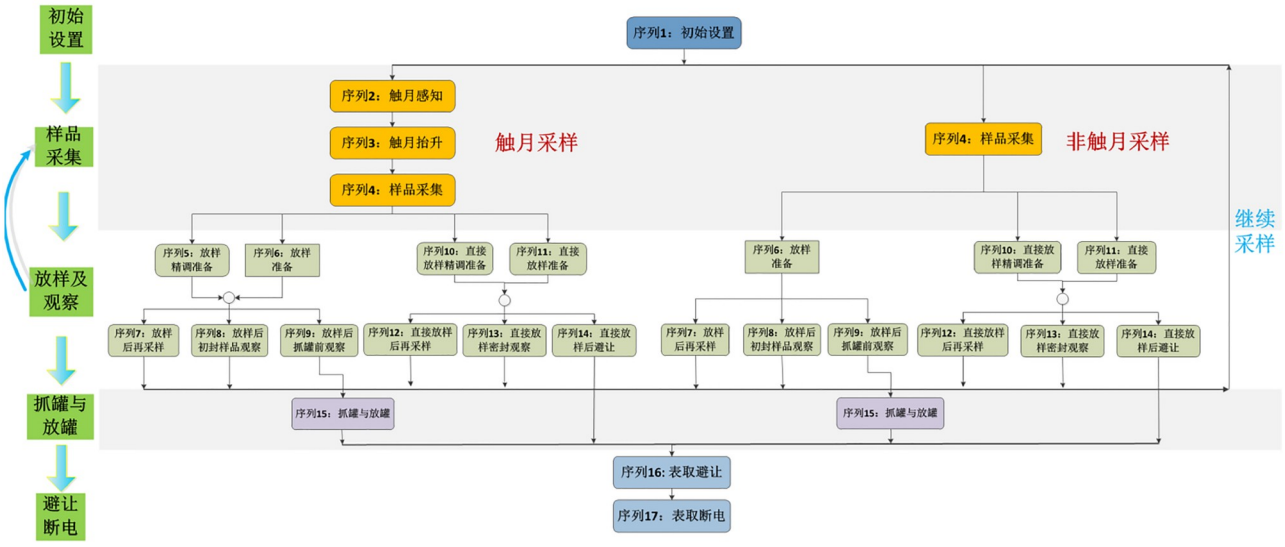


图 4　(网络版彩图)嫦娥六号自主表取采样序列

Figure 4　(Color online) Autonomous sampling sequence of Chang'e-6.

持条件下采样安全;

(2) 减少钻进行程, 标准状态下, 钻进深度约500 mm;

(3) 提芯整形增加钻具前端月壤清除环节;

(4) 提芯整形过程中增加冲击、回转次数, 确保顺利完成提芯整形工作;

(5) 采用预编程完成剪切分离.

该序列无需人工干预, 可以根据设定的时间自动触发执行, 满足月面应急状态采样需求.

6.3　月背起飞设计

针对月球背面起飞任务特点重点开展了月面自主定位方法研究以及自主起飞的系统设计.

6.3.1　月面自主定位系统设计

由于着陆区位于月球背面, 无法采用无线电测量方式进行自主定位, GNC自主定位成为嫦娥六号主要的定位方式. GNC月面自主天文定位方法继承嫦娥五号设计, 采用基于星敏感器和IMU测量的天文定位方法, 具体如下:

(1) 根据星敏感器测量结果, 结合陀螺测量结果, 获得上升器的惯性姿态;

(2) 根据加速度计获得的月球重力方向以及获得的惯性姿态, 解算出探测器相对于月心惯性系的位置;

(3) 根据已知的月球历表, 计算月固系和惯性系的变换阵, 将探测器位置矢量转换到月固系中, 并求解出经纬度信息;

(4) 考虑月球引力场高阶项的影响, 器上计算的重力加速度方向和大小与实际重力加速度方向有偏差, 需要地面根据标称的落点注入位置补偿量, 最终转换为月心经纬度和高度.

综合考虑各项误差, 自主定位精度满足要求. 同时, 嫦娥六号采用了降落相机图像与着陆区高精度底图匹配的辅助定位方案, 对自主定位结果进行确认.

6.3.2　月面自主起飞设计

嫦娥六号落月后初始状态设置和月面起飞准备流程继承了嫦娥五号设计思路[10], 针对月面中继通信的特点及风险, 开展了器上落月初始化状态设置和起飞准备流程的自主设计, 目标为着陆上升组合体能够自主完成落月后初始状态设置和起飞前准备工作, 确保按照既定时刻起飞.

(1) 自主月面初始化设计

为应对中继星捕获不确定的风险, 嫦娥六号探测器采用正常流程与故障预案相结合的思路, 对落月初始化设置自主执行指令, 以提升落月后初始状态自主设置能力.

在工作流程上, 考虑落月后中继通信链路建立时

间的不确定性, 设计了地面遥控介入落月初始化的3种分支来应对中继星与探测器建立前返向链路的不同时间分布.

(2) 自主起飞流程设计与验证

为降低中继链路风险对月面按时起飞的影响, 探测器数管分系统和GNC分系统较嫦娥五号新增了相关自主功能, 并在此基础上, 通过设计合理的飞行程序, 以保证自主起飞流程的可行性和可靠性.

上升器SMU应用软件开辟独立的缓冲区, 用于存储起飞准备需要发送的各类延时指令. 为确保注入的起飞准备指令序列不会误触发, 设置了多道软开关进行保护, 仅当器上自主起飞标志使能, 且接收到7500 N发动机关机信号后启动的独立定时器计时到预定时间后, 从该缓冲区读取对应指令, 当器上时与指令对应的延时时间一致时, 方可执行.

上升器CCU应用软件将原本由飞控阶段地面开展的工作移植至器上自主执行, 主要包括自主加计零偏估计、月面粗姿态计算、星敏及防尘机构自主控制.

6.4 中继通信设计

中继通信链路是探测器在月球背面与地面通信的唯一通道, 为确保探测器与中继星可靠通信, 从中继通信接口指标设计及链路预算、中继通信接口验证、定向天线自主跟踪设计与测试验证、在轨中继对通测试方案等方面开展工作.

6.4.1 中继通信体制设计

中继通信体制保持与对地通信体制一致, 中继通信无测距要求.

(1) 前向链路

中继星对上升器和轨道器的前向链路测控体制与对地上行链路相同, 均采用X频段统一载波测控体制, 调制方式为PCM-PSK-PM.

前向链路仅调制遥控副载波, 不调制测距信号.

(2) 返向链路

上升器、着陆器和轨道器对中继星的返向链路遥测和数传体制与对地下行链路相同, 上升器和轨道器遥测均采用X频段统一载波测控体制(PCM-PSK-PM), 着陆器和轨道器数传均采用X频段抑制载波调制体制(BPSK). 上升器和轨道器与中继星返向遥测链路调制遥测副载波和DOR侧音信号, 不调制测距信号.

6.4.2 探测器对中继星指向分析与设计

嫦娥六号探测器与中继星建立中继链路包括飞行阶段以及月面工作阶段, 在飞行阶段, 探测器主要是通过测控全向天线与中继星通信, 上升器和轨道器测控全向天线均采用异频半空间组阵方式实现全空间覆盖, 与中继星通信和与地面站通信工作模式相同.

在月面工作阶段, 着陆上升组合体采用上升器4根测控天线组合实现全空间接收覆盖. 另外, 上升器设计了一根接收天线作为接收天线备份, 实现月球上半空间测控覆盖.

在双定向天线的配合下, 实现对月面上半空间全覆盖, 能够适应不同发射窗口以及不同着陆姿态偏差影响, 增加任务实施的灵活性.

6.4.3 着陆器定向天线自主跟踪设计

为确保月面工作阶段中继链路可靠工作, 在在轨飞行阶段开展了中继星与探测器的对通测试. 月面工作期间, 着陆上升组合体通过着陆器两副定向天线指向中继星实现与中继星的数传通信任务. 对于着陆器定向天线指向控制, 设计了自主控制方案实现对中继星的连续接力自动跟踪, 在轨飞行任务中, 主用自主跟踪方案. 同时继承保留了嫦娥五号的地面计算后注入指令控制的方案, 在轨飞行任务中, 作为备份使用.

6.4.4 在轨中继对通测试方案设计

第二次近月制动后, 在4 h环月大椭圆轨道上开展中继对通在轨测试, 覆盖探测器和中继星所有中继测控和数传频点. 探测器以标称环月飞行姿态飞行, 中继星始终出现在探测器+X半空间, 位于上升器测控覆盖区域.

针对不同频点的对通测试需求, 探测器绕对日定向(探测器+X)轴旋转指定角度的惯性定向姿态, 满足中继对通余量要求, 且能够保证轨道器天线不被着陆器太阳翼遮挡, 建立与中继星间中继链路. 该姿态下, 能源安全, 热控影响可接受.

6.5 国际载荷搭载设计

6.5.1 搭载接口设计

信息与电接口: 轨道器为立方星提供加热供电接

口、释放分离机构解锁供电接口、信息采集接口，相关安全性设计由轨道器两级开关设计保障；着陆器新增数据转换单元，实现着陆器氡气探测仪和月表负离子分析仪供电接口和信息接口的集中管理，采用双冗余安全模块有效实现国际载荷故障隔离，确保了探测器和国际载荷接口安全．温度采集回路使用热控分系统预留测点.

机械接口：根据国际载荷工作需求及探测器可用资源，氡气探测仪安装在着陆器+Y-Z斜侧板，月表负离子分析仪安装在着陆器−Y侧板, 激光角反射器安装在着陆器顶板的−Y-Z侧，立方星安装在轨道器推进仪器舱+Z侧.

热接口: 为减少热耦合影响, 保持热接口工作界面简洁, 国际载荷与探测器采取了绝热连接设计, 经分析国际载荷和探测器均能各自实现热设计目标，相互热影响可忽略.

6.5.2　任务过程设计

氡气探测仪在地月转移、环月飞行、月面工作等阶段展开环境标定与环月、月面科学探测等各项动作；立方星在第一次近月制动后6 h与探测器分离，开展月球拍照及日月合影, 经分析分离安全满足要求; 月表负离子分析仪在月面工作段开展科学探测；激光角反射器随着陆器永久放置于月背，作为绝对定位点，为后续任务观测提供必要硬件支持.

6.6　长期贮存可靠性评估与验证

嫦娥六号探测器部分产品的贮存时间达到12年, 涵盖了几乎所有种类的航天器产品．为了保证嫦娥六号探测器产品长期贮存后寿命满足要求、状态满足要求，采取“寿命保证+贮存保证”的质量保证方案，并形成了一套系统的工作方法.

6.6.1　寿命保证

根据现有标准、规范、产品说明书、寿命试验、产品类比、旁证材料等支撑材料，充分识别温度、湿度、氧气、时间效应等贮存环境对产品寿命和性能的影响, 分析产品失效机理, 基于产品的组成和功能开展细化至元器件、原材料等最小单元的寿命分析，最终完成产品寿命的全面评估，识别超期产品；针对存在寿命薄弱环节的产品，制定处置方案，通过寿命增长试验、更换超期部件和整机重新投产等措施开展工作, 确保产品寿命满足嫦娥六号任务要求.

6.6.2　贮存保证

总体上采用基于贮存过程控制和贮存健康检查的全流程、全系统贮存保证方法.

产品贮存过程根据产品特点和贮存要求进行精细化管理, 通过贮存环境控制和贮存过程管控, 确保产品贮存期间产品状态受控.

产品贮存期间，对产品的健康状态进行了定期检查和确认，有电性能的产品每6个月进行加电自检测试，并对产品的外观状态进行检查确认；机构类产品，每12个月进行机构运动测试，并对产品的外观状态进行检查确认；其余产品定期对产品的外观状态和贮存状态进行检查确认.

产品贮存结束后，对产品进行全面的检查和确认，确认产品状态和性能满足任务要求；同时为了暴露产品经历长期贮存环境后的潜在缺陷，排除产品的早期失效，开展减半验收级随机振动试验和验收级热真空试验.

开展必要的长期贮存产品的旁证检查和测试，包括陪存件旁证检查和测试和温度梯度试验.

6.6.3　贮存后质量评价

以嫦娥五号产品历次地面测试数据和在轨数据为验前信息，以嫦娥六号产品贮存前历次测试数据为现场信息，以验前信息对现场信息的相容性检验水平为依据, 分配验前信息权重, 扩展现场信息权重; 在此基础上通过抽样构造给定置信区间下产品关键参数控制限区间，通过对比嫦娥六号产品贮存后测试数据与控制限区间的位置关系，判断嫦娥六号产品贮存后质量是否满足要求.

6.7　有效载荷设计

为月面采样工作提供支持，并同时开展月表形貌与地质构造调查、月表物质成分与资源勘察、月球浅层内部构造等科学探测工作.

探测器在着陆器上配置了8台有效载荷设备, 由全景相机A/B及全景相机转台、月壤结构探测仪、月球矿物光谱分析仪、降落相机、国旗展示系统和载荷数据处理器组成. 有效载荷系统如图5所示.

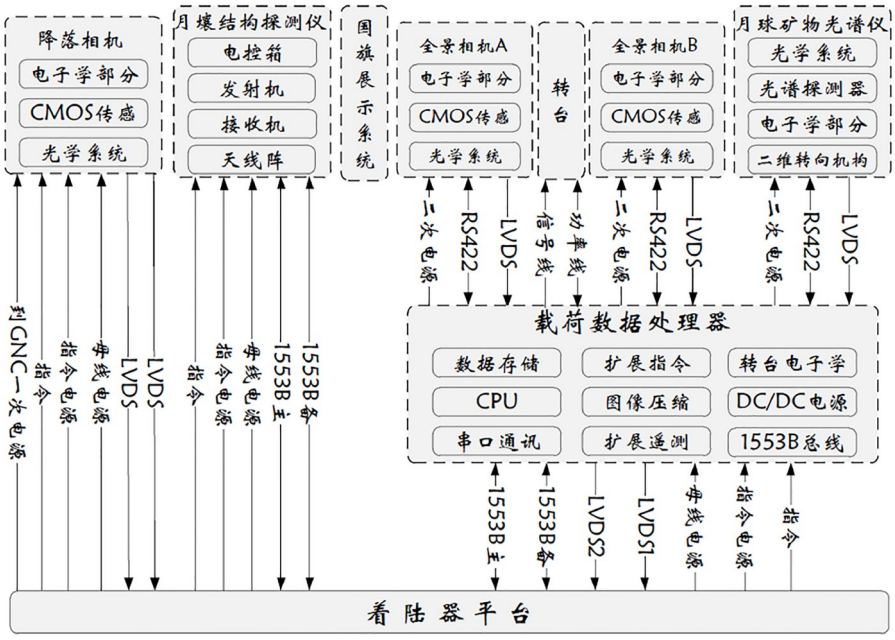


图 5 有效载荷系统构成框图
Figure 5 Block diagram of payload system.

7 主要在轨飞行结果

7.1 在轨中继星对通测试

2024年5月12日至5月15日，探测器第二次近月制动和第三次制动间，中继星与在环月轨道上运行的嫦娥六号探测器开展了在轨中继通信对通测试工作，验证了中继通信接口功能与部分性能指标的正确性与匹配性. 中继对通测试期间, 中继星各分系统均设置为主份工作状态.

7.2 月背软着陆

嫦娥六号探测器经过地月转移、近月制动、环月飞行后，着陆上升组合体于2024年6月2日06:09(北京时间，下同)实施动力下降，并于2024年6月2日06:23安全着陆月面.

着陆上升组合体着陆位置为西经−153.9°，南纬−41.6°.

7.3 月背采样及封装

着陆上升组合体于2024年6月2日09:57开始钻取采样任务，通过实施月面钻进取芯、提芯整形、密封封装装置开始打开、反转观测、软袋收尾、剪切分离和展开避让工作，成功将钻取初级封装容器及样品转入初级封装装置，钻取深度约1.0 m，工作历时约2 h 35 min.

着陆上升组合体于2024年6月2日19:13开始表取采样任务, 见图6, 通过1次遥控和7次序列化采样放样, 成功将表取初级封装装置放入密封封装装置完成月面采样. 该段工作历时约8 h. 最终, 密封封装装置正常完成密封闭盖与金属挤压密封，月面采样封装过程结束, 成功获取1935.3 g月球样品.

7.4 有效载荷工作情况

2024年6月2日，月壤结构探测仪在着陆器着陆月面后第一次开机工作，对钻取下方月壤结构特性进行探测，为钻取采样提供数据辅助判定. 钻取采样结束后月壤结构探测仪、月球矿物光谱仪、全景相机分别开机探测, 图像数据、工程数据实时下传至地面. 第一弧段结束后，在不可测控区月球矿物光谱仪进行自主探测; 随后进行全景相机图像试拍; 表取采样前，使用全景相机对表取前采样区进行了1次环拍. 全景相机成像如图7所示.

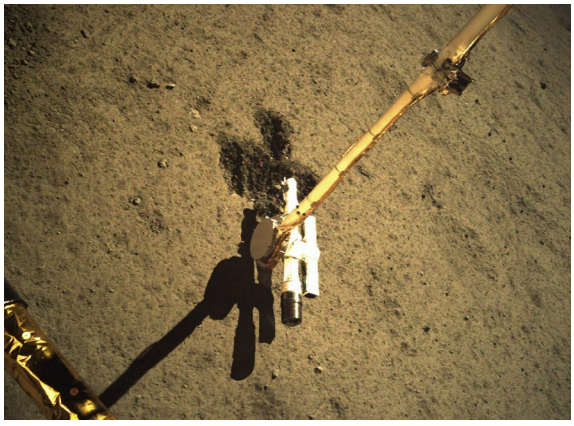


图 6　(网络版彩图)月面表取采样工作图像
Figure 6　(Color online) Sampling photos of the Moon surface.



图 7　(网络版彩图)全景相机环拍图像
Figure 7　(Color online) Photos of panoramic camera ring shot.

月球矿物光谱仪在表取采样过程中和表取后进行开机探测. 表取采样期间对采样点进行了3次开机探测, 表取后进行了采样点全谱段探测. 2024年6月3日07:20, 国旗展开机构解锁, 根据全景相机图像判断, 国旗展开正常, 如图8所示. 全景相机对表取后采样区进行环拍, 随后全景相机再次进行国旗拍照.

在嫦娥六号任务过程中, 有效载荷生成科学数据12.256 Gbits, 其中全景相机图像8870幅, 降落相机图像656幅, 月壤结构探测仪探测数据64 Mbits, 月球矿物光谱分析仪探测数据3.2 Gbits.

7.5　月背起飞上升

上升器于2024年6月4日7:38实施月面上升, 上升器以着陆器为平台实施起飞上升, 依次经过垂直上升、快速调整、轨道射入控制, 在2024年6月4日7:44, 准确进入预定环月轨道.

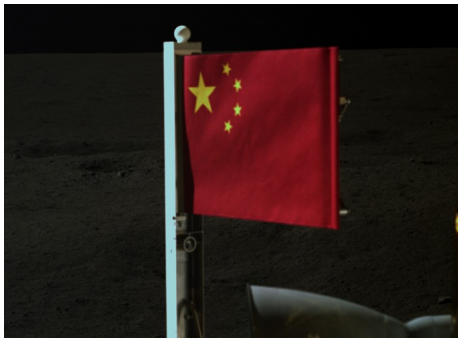


图 8　(网络版彩图)国旗展开后图像
Figure 8　(Color online) Photos after the national flag unfurled.

7.6　月球轨道交会对接与样品转移

2024年6月6日10:39, 上升器准确到达轨返组合体前方约50 km、上方约10 km处预定交班位置, 轨返组合体顺利转入自主控制; 12:52, 轨道器正常转入保持状态; 13:23, 对接机构抱爪正常打开; 14:23, 正常转入100 m保持; 14:38, 正常转入最后平移靠拢; 14:47, 对接机构抱爪捕获, 对接开始; 14:48, 锁近完成, 两目标交会对接正常完成, 对接过程如图9所示.

15:00, 样品转移开始, 转移过程约9 min; 15:12, 转移导轨收回; 15:24, 返回器舱盖关闭; 15:43, 对接组合体开始建立对日巡航姿态. 探测器按照预期完成了交会对接与样品转移任务, 样品转移过程如图10所示.

7.7　返回再入

轨返组合体于2024年6月25日13:21实施轨返分离, 轨道器在2024年6月25日13:30实施规避机动, 返回器在约13:41再入大气层, 14:07着陆于内蒙古四子王旗. 返回器着陆后的状态如图11所示.

7.8　搭载设备工作情况

立方星于2024年5月8日16:14在12 h环月轨道上与探测器顺利分离, 圆满实现了既定目标, 并完成了日月合影及月球拍照; 氡气探测仪在地月转移、环月飞行、月面工作等阶段展开了环境标定与科学探测; 月表负离子分析仪在探测器着陆后开展了原位科学探测, 氡气探测仪和月表负离子分析仪均获取了大量的科学探测数据, 圆满完成了既定探测任务; 激光角反射器随探测器着陆后作为测距信标永久驻留月球背面; 完成月面采样任务之后, “金蝉号”月面自主智能微

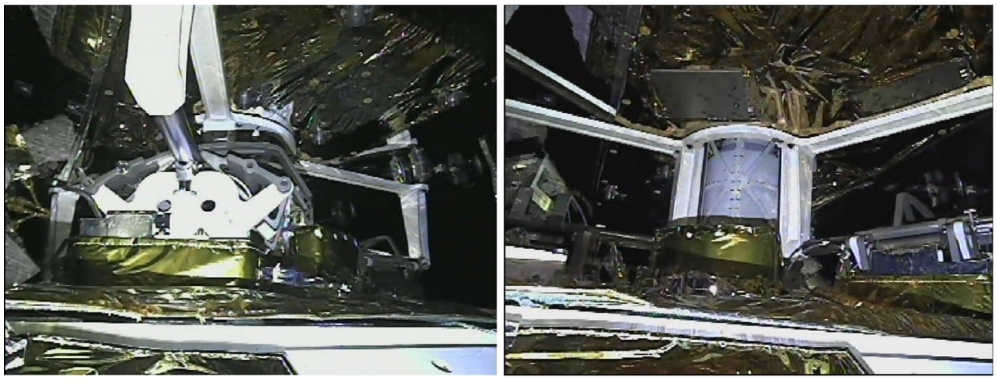


图 9 (网络版彩图)交会对接过程图像
Figure 9 (Color online) Photos of rendezvous and docking.

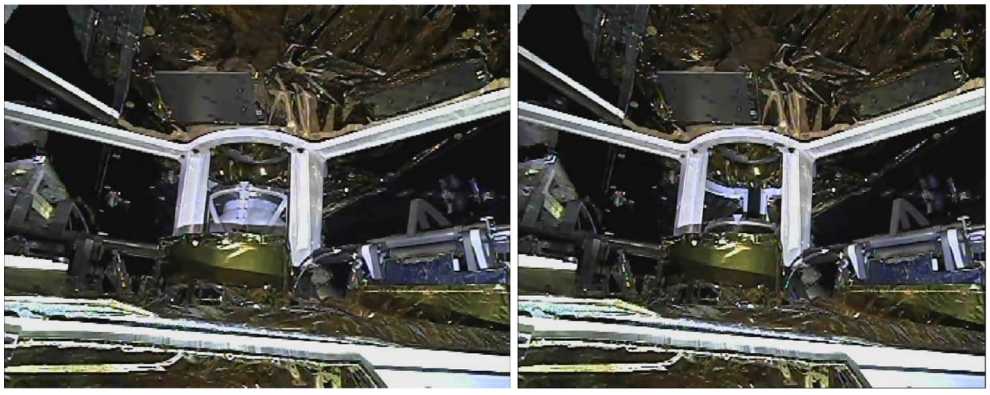


图 10 (网络版彩图)样品转移过程图像
Figure 10 (Color online) Photos of sample transfer.



图 11 (网络版彩图)返回器着陆后状态
Figure 11 (Color online) Photos of the return capsule landed on Earth.

小机器人与着陆器释放分离，完成了月面智能感知、导航、移动与取景等任务，成功拍摄并回传了嫦娥六号着陆器和上升器的月面工作合影照片，如图12和13所示, 实现了人工智能技术在月球探测中的突破.

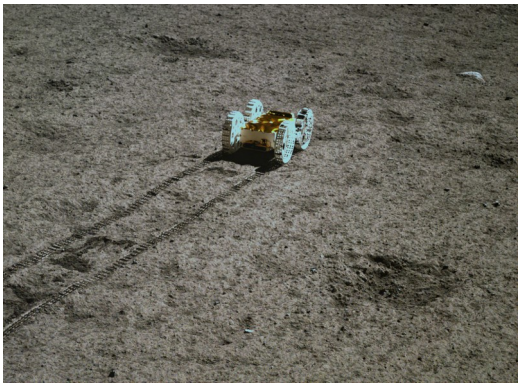


图 12　(网络版彩图)智能微小机器人月面工作图像
Figure 12　(Color online) Photos of an autonomous intelligent microrobot on the lunar surface.



图 13　(网络版彩图)智能微小机器人拍摄的着陆上升组合体
Figure 13　(Color online) Lander and ascender module photographed by an autonomous intelligent microrobot.

8　结论

嫦娥六号探测器面对产品状态基本确定、月背环境复杂、月背依赖中继通信、产品长期贮存、搭载国际载荷安全性要求高等任务特点和难点，全面开展了系统设计及产品保证工作，在人类历史上首次实现月背采样返回，突破了逆行轨道设计与控制技术、月面智能采样技术、月背自主起飞等关键技术．型号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，这些成果可用于地外天体采样返回等深空探测任务，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．

参考文献

1　Information Office of the State. White Paper: China’s Space Activities in 2021 (in Chinese). 2021 [国务院新闻办公室. 《2021的中国航天》白皮书. 2021]
2　Yang M F, Zhang G, Zhang W, et al. Technical design and implementation of Chang’e-5 robotic sample return mission on lunar surface (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 738–752 [杨孟飞, 张高, 张伍, 等. 月面无人自动采样返回任务技术设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 738–752]
3　Yang M F, Zou Z G, Wang W H, et al. Progress and prospect of lunar resources exploitation and utilization (in Chinese). Chin Space Sci Tech, 2024, 44: 1–10 [杨孟飞, 邹志刚, 汪卫华, 等. 月球资源开发利用的进展与展望. 中国空间科学技术, 2024, 44: 1–10]
4　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 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 111–123 [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设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 111–123]
5　Yang M F, Peng J, Zhang W, et al. Lunar robotic probe technology for sampling and return (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2022 [杨孟飞, 彭兢, 张伍, 等. 月面无人自动采样返回技术. 北京: 国防工业出版社, 2022]
6　Zhang H H, Guan Y F, Li J, et al. Adual-loop fault tolerant attitude control for the Chang’e-6 lunar orbit flight (in Chinese). Chin Space Sci Tech, 2024, 44: 15–22 [张洪华, 关轶峰, 李骥, 等. 嫦娥六号环月飞行双环容错姿态控制. 中国空间科学技术, 2024, 44: 15–22]
7　Meng Z F. Innovation and inspiration of Chang’e 6 mission trajectory design (in Chinese). Aerosp China, 2024, 7: 14–21 [孟占峰. 嫦娥六号任务轨道设计技术创新与启示. 中国航天, 2024, 7: 14–21]
8　Meng Z F, Gao S, Zhao Q, et al. Chang’e-6 mission planning using geometry approach (in Chinese). Chin Space Sci Tech, 2024, 44: 1–15 [孟占峰, 高珊, 赵峭, 等. 嫦娥六号飞行方案的任务几何规划方法. 中国空间科学技术, 2024, 44: 1–15]
9　Deng X J, Zheng Y H, Jin S Y, et al. Design and implementation of sampling, encapsulating, and sealing system of Chang’e-5 (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 753–762 [邓湘金, 郑燕红, 金晟毅, 等. 嫦娥五号采样封装系统设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 753–762]

10 Shu Y, Xing Z Y, Zhang X H, et al. Designing and implementing the liftoff of Chang'e-5 spacecraft from the Moon (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 1465–1479 [舒燕, 邢卓异, 张旭辉, 等. 嫦娥五号探测器月面起飞设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 1465–1479]

Technical design and implementation of Chang'e-6 robotic sample return mission on the far side of the moon

YANG MengFei[1], ZHANG Gao[2], ZHANG Wu[2], RUAN JianHua[2], HUANG Hao[2], PENG Jing[2], DENG XiangJin[2], SHI Wei[2], WANG Yong[3], ZHANG HongHua[3], HONG Xin[4], ZHANG YuHua[5], ZHA XueLei[5], LI TianYi[5] & BAI ChongYan[2]

[1] *China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*
[2] *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China*
[3] *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China*
[4] *Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China*
[5] *Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China*

The Chang'e-6 mission of the fourth phase of the lunar exploration program is China's first mission to sample and return from the far side of the Moon. The objective of the mission was to land on the selected area of the far side of the Moon, collect lunar samples, and return these samples to Earth safely through the processes of lunar lift-off, lunar orbit rendezvous and docking, sample transfer, Moon-to-Earth transfer, and reentry. This paper describes the mission's technical features, brief introduction, and development process, summarizes the breakthroughs and innovation of the key technologies involved, and presents the flight results. The on-orbit results show that all functions and specifications satisfy the mission requirements, the spacecraft is in good condition in flight, and the design of the scheme is validated.

lunar exploration phase IV, Chang'e-6, the far side of the Moon, sample return mission, flight results

doi: 10.1360/SST-2024-0287