



# 嫦娥六号任务总体设计与实现

胡浩<sup>1</sup>, 王琼<sup>1</sup>, 黄昊<sup>2</sup>, 左维<sup>3</sup>, 葛平<sup>1</sup>, 胡震宇<sup>1</sup>, 胡浩德<sup>1\*</sup>, 黄磊<sup>4</sup>, 王建明<sup>5</sup>, 程艳合<sup>6</sup>,  
孙骥<sup>2</sup>, 李晨阳<sup>4</sup>, 李慧军<sup>7</sup>

1. 国家航天局探月与航天工程中心, 北京 100190
2. 中国空间技术研究院, 北京 100094
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101
4. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094
5. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076
6. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094
7. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

\* E-mail: [huhaode@126.com](mailto:huhaode@126.com)

收稿日期: 2025-02-08; 接受日期: 2025-05-22; 网络版发表日期: 2025-07-10

**摘要** 嫦娥六号任务实现了人类首次月球背面采样返回任务. 本文针对任务复杂度高、产品保证难度大、飞行控制要求高、研制周期紧张及实施风险复杂多样等难点, 提出了设计中继通信链路支持月背测控、优化探测器设计适应月背采样、增强全系统可靠性确保任务成功的总体设计思路, 重点阐述了采样区设计、月背采样设计、国际合作项目设计等任务关键环节设计与验证, 并且概述了研制实施过程和在轨飞行结果.

**关键词** 嫦娥六号, 总体设计, 月背采样, 月背起飞, 国际合作

## 1 引言

2024年5月3日, 嫦娥六号探测器由长征五号运载火箭在文昌航天发射场成功发射. 经历53天的飞行后, 返回器携带1935.3 g月球背面样品在内蒙古四子王旗着陆场安全着陆<sup>[1]</sup>. 嫦娥六号任务取得圆满成功, 在人类历史上首次实现月球背面采样返回, 是我国建设航天强国、科技强国取得的又一标志性成果.

嫦娥六号原本是嫦娥五号的备份<sup>[2]</sup>, 在2020年底嫦娥五号任务成功取回1731 g月球样品之后, 被赋予了新的使命. 2021年3月起, 工程总体组织开展了嫦娥

六号任务方案优化论证工作. 综合考虑科学价值、技术可行性、社会效益、计划可行性等因素, 论证提出嫦娥六号任务于2024年发射, 着陆月球背面南极-艾特肯盆地开展采样返回和科学探测. 本文对嫦娥六号的任务特点、研制过程进行了介绍, 对任务关键环节的设计进行了总结, 并展示了在轨飞行结果.

## 2 任务分析

通过嫦娥五号任务的实施<sup>[3]</sup>, 月球采样返回所需的基础设施、关键技术已经具备, 嫦娥六号探测器产

引用格式: 胡浩, 王琼, 黄昊, 等. 嫦娥六号任务总体设计与实现. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 1194–1206  
Hu H, Wang Q, Huang H, et al. Overall design and implementation of Chang'e-6 mission (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 1194–1206, doi: 10.1360/SST-2025-0028

品也已经投产. 在此条件下, 经过深入论证, 确定以月球背面南极-艾特肯盆地为着陆区, 采样区域如图1所示, 对探测器进行适应性改进同时搭载多种国际新型载荷的工程方案, 实现空间科学和工程技术的双重跨越和创新.

## 2.1 任务目标选取

嫦娥六号任务工程目标为: 突破月球逆行轨道设计与控制技术、月背自主快速采样技术和月背自主起飞上升技术, 实现月球背面自动采样返回, 同时开展有效的国际合作.

任务科学目标为: (1) 月球背面着陆区的现场调查和分析. 开展月球背面南极-艾特肯盆地着陆点区域地貌探测和地质背景勘察, 获取与月球样品相关的现场分析数据, 建立现场探测数据与实验室分析数据之间的联系. (2) 月球背面样品的分析与研究. 对月球背面样品进行系统、长期的实验室研究, 分析月壤的结构、物理特性、物质组成等, 深化月球成因和演化历史的研究.

## 2.2 任务总体设计思路

嫦娥六号以嫦娥五号构建的地外天地采样返回能力为基础, 充分继承嫦娥五号的成功经验. 工程系统整体架构继承嫦娥五号任务<sup>[4]</sup>. 在深化嫦娥五号经验认识的基础上, 确立了嫦娥六号任务的总体设计思路: 瞄准当今世界前沿, 创新设计顶层任务, 实现科学上有新意, 技术上有新突破, 国际合作有新收获. 充分继承成熟技术和产品并进行适应性改进和技术升级, 引入必要功能模块, 通过原始创新和集成创新相结合, 实现高效益、高可靠、低成本的任务; 通过开放资源引入国际载荷和国内搭载项目, 提高工程影响力并服

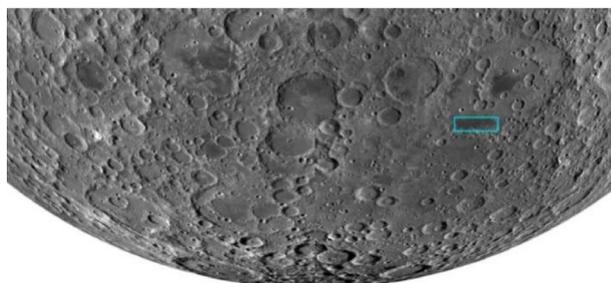


图1 (网络版彩图) 采样区域(西经 $154^{\circ}\pm 4^{\circ}$ , 南纬 $43^{\circ}\pm 2^{\circ}$ )  
Figure 1 (Color online) Chang'e-6 sampling area ( $154^{\circ}\pm 4^{\circ}$ W,  $43^{\circ}\pm 2^{\circ}$ S).

务国家政治外交.

### (1) 瞄准重大科学问题实施国际首次月背采样返回

在嫦娥六号之前, 国际上从未实施过月球背面采样返回任务. 月球背面和正面在地质结构、物质成分、岩浆活动演化历史等方面存在显著差异, 科学家将此称为月球的“二分性”, 但其形成机理仍是国际学术界研究热点. 获取月球背面的样品将为揭示这一重大科学问题提供重要线索. 月球背面的南极-艾特肯盆地形成于43亿~39亿年前的前酒海纪, 是月球上最古老和最大的撞击盆地, 可能存在40亿年前的月球样品<sup>[5]</sup>. 盆地形成时的大撞击可能抛射出下月壳乃至月幔的深部物质<sup>[6]</sup>, 同时在该区域内钍、铁、钛等元素含量丰富<sup>[7]</sup>. 因此嫦娥六号瞄准南极-艾特肯盆地采集并返回人类首份月球背面样品.

### (2) 深入挖掘潜力开展国际合作提升工程效益

在满足主任务实现需求的同时, 以科学创新引领、兼顾带动发展为目标开展国际载荷搭载, 科学评估国际载荷对任务的影响和风险, 优化工程任务资源, 系统设计月背原位探测方案, 丰富科学产出. 针对国际搭载载荷涉及国别多、设计标准不一致、器件选用来源广、产品创新性强、研制过程质量保证难、交付进度与探测器主线研制进度匹配性控制难, 提出了接口高适应、故障可隔离、任务可重构的一体化国际载荷搭载和探测方案, 解决了在探测器产品技术状态确定、任务资源受限条件下实现多种类载荷高可靠搭载和高效协同探测的难题. 构建开放平等融合集成的质量管理体系, 实现安全、可靠、柔性、高效的全寿命周期质量保证, 解决国际载荷研制流程和标准规范各不相同、计划进度与工程主任务匹配控制难度大、难以深入管控产品研制过程质量等难题. 开展国际载荷接口研制试验, 针对分离模块开展分离专项试验, 验证载荷搭载接口正确性与安全性, 实现国际载荷与探测器的有效融合与集成. 通过国际合作进一步提升任务的投入产出比和国际影响力; 同时为我国后续月球和深空探测工程开展国际合作积累技术与管理经验.

### (3) 优化任务设计适应月背采样需求

针对月球背面采样返回的任务特点, 设计了利用鹊桥二号中继星在着陆下降段、月面工作段和月背起飞上升段提供支持的中继通信链路. 重点关注中继通信链路余量、探测器和鹊桥二号中继星的轨道协同匹配性、鹊桥二号中继星指向精度和波束覆盖性等关键

事项, 确保中继链路满足探测器月背测控需求. 通过多阶段的对接试验, 充分验证中继链路可靠性及在中继星参与下复杂协同工作程序的正确性.

针对变更采样地点、增加中继通信、搭载国际载荷等新的设计约束, 对探测器进行优化改进. 月背中继链路支持时长有限, 通过增强采样自主化提高采样效率; 月背着陆位置无法通过地面测控站给出, 通过自主定位实现月背起飞精准入轨; 着陆位置由嫦娥五号月球北纬变化为月球南纬, 采样区域范围受月背崎岖地形限制大幅缩小, 通过创新优化轨道设计方案, 最大程度减少探测器技术状态更改并缩小着陆区散布范围.

#### (4) 增强全系统可靠性确保任务成功

针对以继承产品为主实施开拓性任务的总体特点, 从多系统多维度开展可靠性提升工作, 确保任务可靠实施. 开展探测器产品长期贮存影响分析、寿命评估和必要的试验验证, 确保产品不带疑点上天. 进一步提高运载能力, 应对探测器环月逆行轨道设计和环月时长增长导致的推进剂消耗增加. 优化运载火箭环境适应性设计, 提高发射场保障能力, 拓展发射包络范围, 实现全天候、高可靠发射. 增强多目标测控能力, 应对鹊桥二号中继星和巴基斯坦立方星等测控目标增加带来的挑战. 建立多任务测控资源协调机制, 满足月球和火星等多个探测任务并行测控的资源约束. 优化搜索回收设计, 实现高效可靠地回收月背样品的目的. 采用工程整体式推进方法, 建立了与工程产品深度融合的质量闭环管理、多层次进度控制等机制, 实现工程系统的协同有序推进.

### 2.3 任务难点分析

嫦娥五号使我国具备了地外天地采样返回的能力, 但月球背面采样返回这一新的任务使命仍然带来了不少新的挑战, 主要表现为以下六个方面.

(1) 任务高度复杂, 技术挑战大. 月球背面工作需要中继通信支持, 鹊桥二号中继星引入大系统后带来了通信链路增长、冗余度下降、星器协同配合、测控目标增加控制难度上升、大系统可靠性降低等一系列挑战, 任务复杂度显著上升. 此外鹊桥二号中继星又是新研项目, 需服务多次探月任务, 研制周期紧, 试验项目多, 研制进度风险大, 进一步提升了技术和管理复杂度.

(2) 产品贮存时间长, 质量和可靠性保证难度大. 嫦娥六号探测器产品已于2016年按照嫦娥五号状态完成投产, 经历长达八年的贮存后产品老化、可靠性降低, 部分产品寿命超期、失效风险高, 部组件更换又引入了额外操作风险, 同时为适应月背采样必须开展功能与优化改进设计, 使得产品保证复杂困难.

(3) 多目标协同控制, 实施难度大. 任务11个飞行阶段需完成6次分离和1次交会对接, 姿态机动控制上百次, 测控指令密集、时效性强、指令之间耦合性强, 新增了中继测控模式, 测控目标增加且相互耦合, 探测器、中继星、测控站天地协调一致性要求极高, 面临高时效要求下的协同控制失误风险. 在嫦娥六号任务实施期间面临其他任务测控目标并行实施的情况, 测控资源紧张, 多任务切换测控目标频繁, 设备安全运行和操作风险大.

(4) 研制周期受限, 计划匹配难度大. 嫦娥六号任务于2022年8月正式启动, 到2023年12月完成出厂, 研制周期不到一年半. 不但要完成国际载荷的研制, 探测器总装、集成与测试, 还要完成探测器与鹊桥二号中继星和近十个测控、数据接收站的对接以及多项大系统协同试验, 计划调整余地很小, 如期完成任务的挑战艰巨.

(5) 国际载荷状态复杂, 高可靠搭载难度大. 嫦娥六号任务研制周期短, 探测器搭载资源受限且技术状态基本确定, 搭载国际载荷需研制专门的接口管理单元, 并确保故障可隔离不影响主任务实施. 巴基斯坦立方星在月球轨道分离需确保分离安全性并安排相应的测控资源. 此外, 国际载荷来自不同国家, 研制流程和工作标准与国内不匹配. 上述因素导致如期完成国际载荷研制、实现高可靠搭载的难度大.

(6) 实施风险复杂多样. 对月背地形和风化层月壤的认识不充分导致着陆和采样风险无法规避; 测控目标多且实时性强, 操控风险大; 中继链路存在失效风险, 在轨故障预案制定困难; 研制进度风险派生出产品进一步超期失效的风险. 这些风险对任务的可靠实施构成了极大的挑战.

## 3 任务关键环节设计

### 3.1 科学载荷设计

除了实现月球背面自动采样返回, 就位科学探测

也是嫦娥六号任务的工作重点, 在配置国内科学载荷的同时还搭载了国际载荷.

(1) 国内载荷配置

嫦娥六号任务继承嫦娥五号配置降落相机、全景相机、月球矿物光谱分析仪、月壤结构探测仪等有效载荷开展月球背面南极-艾特肯盆地着陆点区域形貌探测和地质背景勘察<sup>[8]</sup>, 有效载荷配置如图2所示. 降落相机获取着陆器降落过程中各个高度时着陆区域的月表形貌特征图像; 全景相机获取着陆区月表形貌图像, 支撑表取采样点选择; 月球矿物光谱分析仪现场获取月表样品短波红外发射光谱信息, 分析其矿物组成特征; 月壤结构探测仪探测着陆点月壤厚度和结构<sup>[1]</sup>. 针对月背采样特点, 对有效载荷进行了适应性评估与改进, 着力提高有效载荷对月背环境适应性和探测可靠性, 确保有效载荷完成既定科学探测目标.

全景相机转台控制除了采用常规空间环境适应性设计外, 还采用了多模式冗余和故障隔离控制技术, 提

高了设备在月背表面严酷环境下可靠运行的能力. 针对快速着陆下降过程中带宽有限条件下降落相机月面成像质量要求高的特点, 采用低宽带高质量图像压缩技术和高可靠快速收敛自动曝光技术, 有效改善图像质量. 针对月背中继通信弧段有限的特点, 采用有效载荷自主运行控制技术, 实现了有效载荷设备在无实时测控条件下设备的序列化协同工作, 最大化利用月背有效探测时间. 月壤结构探测仪针对实时高精度识别碎石富集区的难题, 提出新型高效成像方法, 大幅缩短目标反演成像时间, 获得了钻取区域浅层月表精细结构, 为钻取采样提供了有力支撑.

此外还配置了国旗展示系统, 攻克了玄武岩超细纤维纺纱、织造及色彩构建等诸多国际难题, 玄武岩月面国旗产品, 为未来月球原位资源利用进行了积极探索.

(2) 国际搭载载荷

嫦娥六号搭载的4台国际合作载荷包括法国氦气探测仪、欧洲航天局(欧空局)月表负离子分析仪、巴

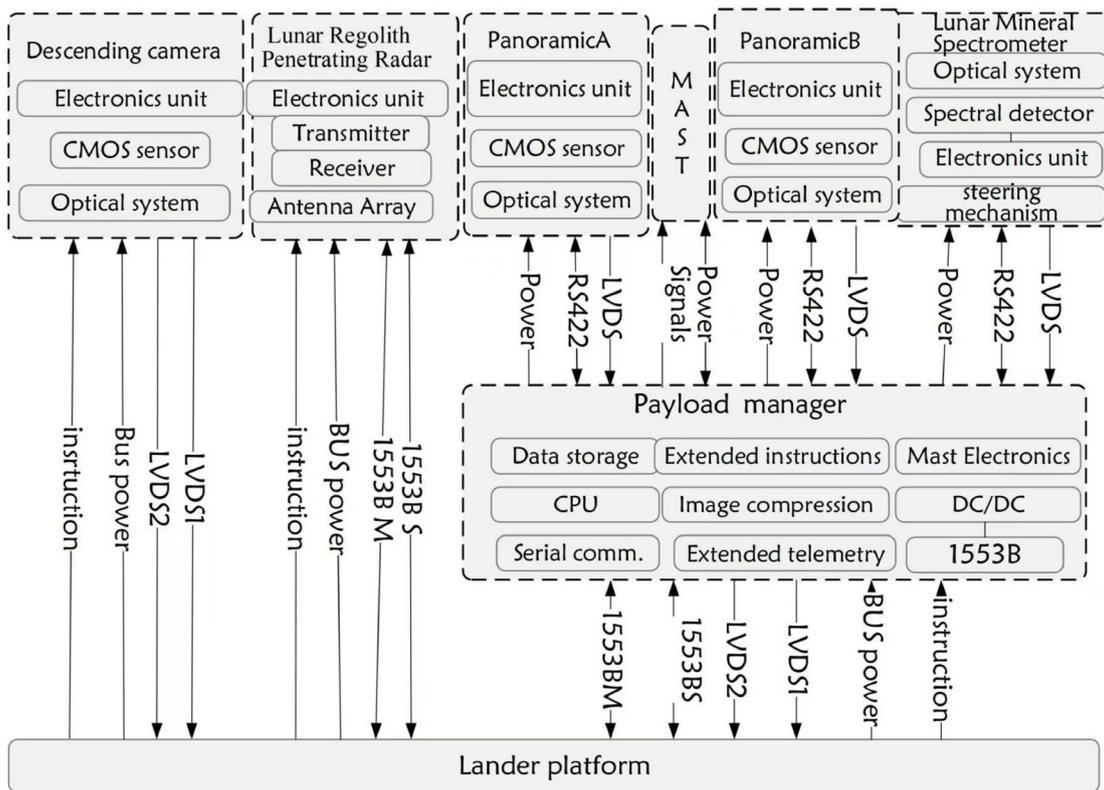


图2 有效载荷配置  
Figure 2 The payload of Chang'e-6.

基斯坦立方星和意大利激光角反射器. 法国氦气探测仪搭载于着陆器, 对月球表面氦气同位素开展原位探测, 测量挥发物在月球表面和月球外层空间传输和扩散机制; 欧空局月表负离子分析仪搭载于着陆器, 探测研究等离子体和月面的相互作用机制及月球表面逃逸层的物理机制. 巴基斯坦立方星搭载于轨道器, 在探测器第一次近月制动后的大椭圆轨道远月点与探测器分离, 开展在轨对月成像; 意大利激光角反射器搭载于着陆器, 可以与其他月球探测任务开展联合测距与定位研究<sup>[1]</sup>. 为满足国际载荷搭载需求, 针对探测器原有安装布局、温度环境、供电及信息接口进行了优化升级, 利用现有平台实现工程技术更新. 综合考虑探测器空间、重量和能源余量, 实现资源优化统筹配置; 综合考虑国际载荷和现有设备布局、整器质心配平需求、国际载荷工作时段等约束, 改进轨道器和着陆器机械布局, 优化器上设备组成, 实现最优布置; 利用轨道器上原有预留资源满足立方星供配电需求. 设计数据转换单元, 实现国际载荷供电、数据与信息交换处理, 满足氦气探测仪和月表负离子分析仪的模式控制、遥测、科学数据传输需求的同时, 通过数据转换单元实现故障隔离设计, 确保国际载荷即使发生故障也不影响探测器正常工作.

### 3.2 弹道与轨道设计

针对长征五号运载火箭发射弹道设计, 每天设计多套奔月轨道和飞行诸元, 通过切换弹道将运载火箭起飞时刻偏差由 $\pm 25$  min缩小至 $\pm 5$  min以内, 将运载火箭入轨精度提高了80%; 同时采用窗口时段高精度、整层预报风进行飞行程序设计, 将我国探月工程“窄窗口、多弹道”奔月发射方案高空风放行概率由95%提升至99.7%, 12~15 km最大动压区抗风能力由35 m/s提升至45 m/s. 运载火箭系统联合发射场全面增强和改进灾害性天气预警能力, 特别是台风、强热带气旋、雷暴等, 太平洋台风预警能力由3~5天增强至7天, 强热带气旋预报置信概率由75%提升至90%, 制定并实施了50余套逆流程和故障处置预案. 同时通过优化设计, 显著增强了大型低温运载火箭的防水、防潮和防盐雾腐蚀能力. 通过以上创造性设计, 运载火箭具备了全天候、高可靠发射能力.

嫦娥六号任务采样区域位于月球背面西经 $154^{\circ} \pm 4^{\circ}$ , 导致采样点进入轨道面的时刻较之嫦娥五号发

生变化, 进而导致动力下降前的环月等待时长增加; 另一方面, 再入航程的限制, 导致月地入射前的环月等待时间也需相应增加. 近月制动时间由1天增加至约21天; 四器分离至动力下降前的飞行时间由2天增加为3天; 环月等待时间由约6天增加为约14天. 嫦娥六号任务的总飞行时长由嫦娥五号任务的约23天增加至约53天. 长时间环月巡航飞行给轨道设计带来了调整、优化的余地, 使得轨道可以实现以时间换取能量最优的设计目标<sup>[9]</sup>. 在此基础上设计了全新的三脉冲近月制动捕获策略, 将近月制动分3次实施, 如图3所示, 通过4 h轨道的飞行时间设计, 精确瞄准预定着陆时刻及轨道参数, 解决了嫦娥六号着陆区经度范围变小的难题, 确保了嫦娥六号所有发射机会均可瞄准同一着陆区, 并按预定时刻起飞<sup>[10]</sup>. 同时设计了环月逆行轨道, 解决了着陆月背后外热流环境变化难题, 最大程度减少探测器技术状态更改; 设计了变射向变转移时间的地月转移轨道方案, 解决了发射机会少、器箭分离点散布大的难题, 将嫦娥六号任务发射机会扩大至连续2个月每月2天, 将连续两天发射窗口的器箭分离点散布控制在300 km以内. 设计了 $43^{\circ}$ 的月地转移轨道倾角, 解决了月球赤纬增大造成的航程范围超包络的难题, 确保了各发射窗口的再入航程满足原有再入航程范围要求. 在此基础上, 将再入倾角微调为 $43.2^{\circ}$  (地固系), 即可同时兼顾再入航迹尽可能少经过别国领空的需求和再入航程约束要求.

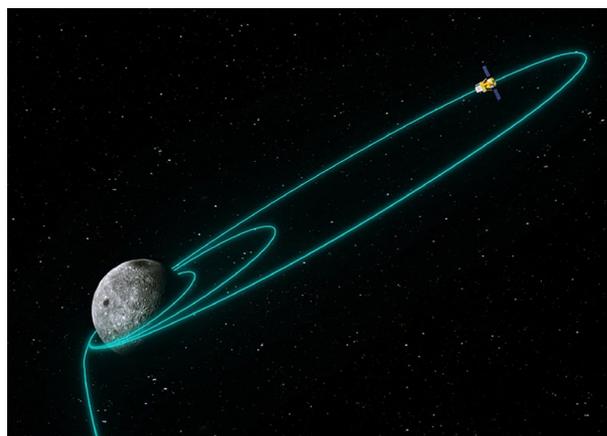


图3 (网络版彩图)三脉冲近月制动轨道示意图

Figure 3 (Color online) Three-impulse lunar braking maneuver trajectory schematic.

### 3.3 中继测控通信链路设计

嫦娥六号任务测控系统主要包括运载火箭测控系统、近地航天测控网、深空测控网、VLBI测轨分系统、再入返回测量链等,各部分通过地面通信网构成一个有机整体,在任务中心的统一调度下共同完成对运载火箭和探测器的各项测控任务.鹊桥二号中继星为嫦娥六号探测器在月球背面对地不可见时提供中继通信,轨道器、上升器、着陆器复用对地测控数传设备与中继星进行通信,中继通信链路如图4所示.任务实施期间地面测控设备对探测器各器、鹊桥二号中继星和巴基斯坦立方星进行测控<sup>[11]</sup>.

对探测器月背动力下降段的中继通信覆盖性进行了分析验证.鹊桥二号中继星伞状抛物面对月天线指向受多项指标约束,其中主要偏差来源为GNC姿态指向偏差、测定轨误差、星历误差、天线电轴与机械轴重合精度、器星时差造成的指向偏差以及星传感器在轨偏差等,根据仿真分析,鹊桥二号中继星伞状天线对探测器的最大指向偏差不超过 $0.13^\circ$ ,在该指向精度下,鹊桥二号中继星有效中继覆盖范围不小于 $\pm 30$  km,满足探测器着陆不确定度要求.

### 3.4 多器协同控制与联合规划设计

针对嫦娥六号任务期间,同时存在嫦娥三号、嫦娥四号、嫦娥五号、天问一号任务部分航天器仍在轨运行,以及鹊桥二号中继星和嫦娥六号四器等多任务多器并行控制带来的多目标测控资源分配困境,以及多任务间几何可见测控弧段较为接近带来的测控时长缩短、应急调整影响大等难题.创新设计了深空多任务背景下鹊桥二号中继星与嫦娥六号探测器联合规划与协同控制方案,制定了嫦娥六号任务期间深空测控资源统一调配策略:分析识别深空探测领域测控目标测控及点频干扰冲突,设计了干扰冲突处置措施;预先汇总各任务测控目标重要控制及日常测控需求,突破了多目标协同规划控制技术,实现了资源冲突自动消解,制定了嫦娥六号任务实施期间测控资源多任务分配方案;综合鹊桥二号中继星的测站使用要求高,以及中继服务高精度测定轨强时效性需求等中继服务工作约束,统筹深空测控资源分配和中继通信支持工作,确保在嫦娥六号任务关键中继通信过程中多器协同控制匹配可靠.在满足其他在轨月球和火星探测器测控需求的前提下,创新解决了鹊桥二号中继星与

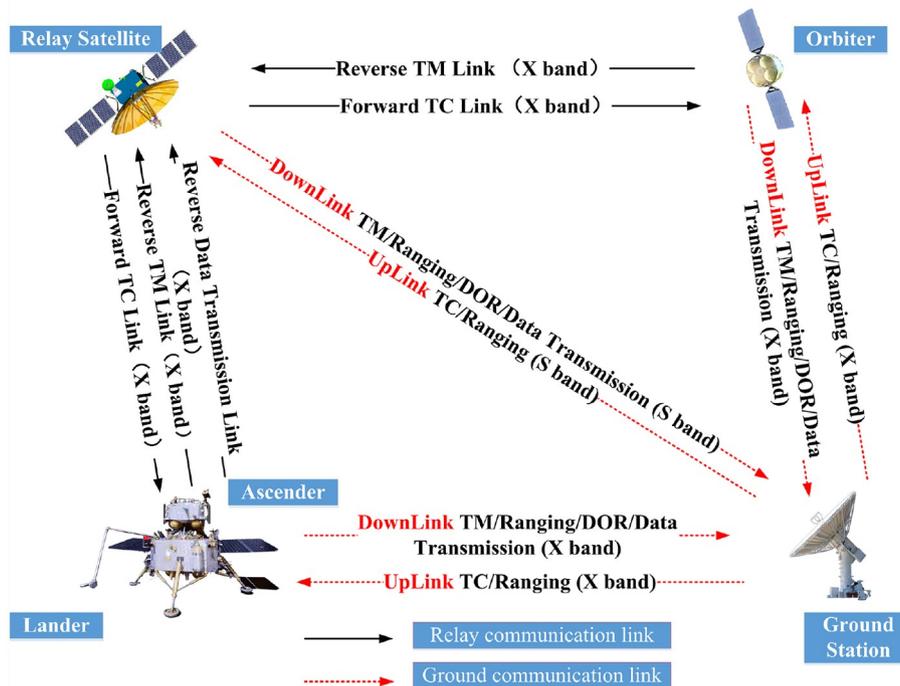


图 4 (网络版彩图)中继测控链路

Figure 4 (Color online) Relay tracking, telemetry and command communication link.

嫦娥六号探测器联合规划与协同控制难题, 确保嫦娥六号任务圆满成功。

### 3.5 月背采样设计

由于目前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的认识还不充分, 具体采样工作对象存在不确定性, 探测器需要适应复杂月背地质特点。月球背面采样中继支持时间相比月球正面采样地面测控弧段大幅缩短, 表取采样时间从21 h缩短为14 h, 表取采样效率需大幅度提升, 要求采样装置具备更高的自主能力。

针对上述约束条件, 嫦娥六号探测器系统通过序列化工作模式设计, 由器上自主开展遥测判读与指令发送, 显著降低器地之间需发送指令数量, 大幅度减少器地交互过程和地面遥测判读时间, 提升采样效率; 在保持嫦娥五号已有功能基础上, 表取增加初始设置、样品采集、放样及观察、抓罐与放罐、避让断电等环节相关的17个工作序列, 实现器上分段或组合序列化控制与自动判读, 高效完成月面表取多点采样与多次放样工作。采用器地一体化采样封装技术, 准确高效地完成采样区地形三维重构、采样点分析选择及机械臂位姿计算, 辅助操作人员实现高效判断和决策。为应对中继通信失效风险, 提升获取月球样品的可靠性, 设计了钻取应急序列, 提升自主获取钻取样品的能力。

在详细分析月球背面的地质和地形特点, 设计了针对复杂地质特点的高效采样策略, 利用尽可能丰富的模拟月壤工况开展了充分试验和验证, 建立了丰富的月壤工况与采样策略映射样本, 提升地面操作人员处理复杂工况的应对能力。同时针对中继链路失效风险, 设计了最小自主采样工作模式。

### 3.6 月背起飞设计

月球背面着陆点无法直接通过地面站测量定位, 探测器需要自主测量定位月背着陆位置。嫦娥六号采用基于星敏感器和IMU测量的天文定位方法并提出了像素级的大区域地形重建方法和框架, 利用着陆器降落相机拍摄的序列影像开展图像特征点提取与匹配工作, 再利用图像匹配结果, 通过与高分辨率卫星影像(嫦娥二号/月球侦察轨道器影像)进行地理配准和关联, 实现着陆点地理三维坐标的确定。

嫦娥六号任务在嫦娥五号的基础上, 为降低中继

通讯异常带来的风险, 提出了多智能终端协同的月面起飞自主化流程方法, 设计了基于时间线的层级状态转移约束规划算法, 解决了起飞时序自主设计多约束、强耦合、失效模式判断难的难题, 实现了无需天地链路配合的月背起飞准备流程的自主化。提出了月背自主起飞导航、制导与控制方案, 通过探测器敏感器高精度测量结果, 在自主定位的基础上, 解决了自主交会对接目标瞄准, 起飞上升航向角计算、自主对准, 星敏和太敏容错调度等难题, 实现月球背面自主起飞上升<sup>[12]</sup>。针对月球背面起飞的关键环节, 探测器系统通过数学仿真、系统测试及整器中继联试、全任务模飞测试、无线联试和发射场模飞等各级测试中开展了全方位验证。

### 3.7 再入回收设计

返回器再入回收过程包括惯性滑行、地球大气再入、回收着陆三个阶段。再入回收过程的在轨飞行时间约1 h, 地面回收时间不超过48 h。返回器采用半弹道跳跃式返回, 2次再入大气层, 具有再入速度高、弹道散布大等特点, 对返回器再入过程的测量至关重要。通过第1次再入过程测量获得出黑障点散布范围预报数据, 确保出黑障后的捕获跟踪; 通过第2次再入过程测量获得落点预报数据。返回器第1次进入黑障时, 无地面测控资源可以利用, 为了对返回器进行状态监视、轨迹测量, 在阿曼以东海域布设测量船, 利用船上的雷达设备进行反射式跟踪测量, 为第1次再入过程提供测控支持, 再入返回测量链无线电设备理论跟踪覆盖如图5所示。针对返回弹道倾角变小, 优化车载多波束设备布局, 确保对返回器快速捕获跟踪<sup>[13]</sup>。

综合返回段光学设备、着陆场区内落点景象测量系统、机载光电吊舱等图像摄录设备, 形成了返回着陆过程的全程光学记录能力, 获取了返回器开伞、乘伞下降、落地等关键环节图像, 实现了返回着陆全过程实况记录, 为实时掌握返回器状态提供了直观依据, 获取的宝贵影像资料为进一步分析返回器空中姿态、着陆特征提供了有力支撑。

嫦娥六号任务提高了搜索回收效率, 通过设计中地面力量部署方案, 充分考虑地空中、面分队独立执行任务各项预案, 实现了返回器着陆后搜索直升机同步着陆, 从返回器着陆到搜索人员抵达现场用时4分32秒, 转运至北京用时约19时56分, 敏捷高效地完

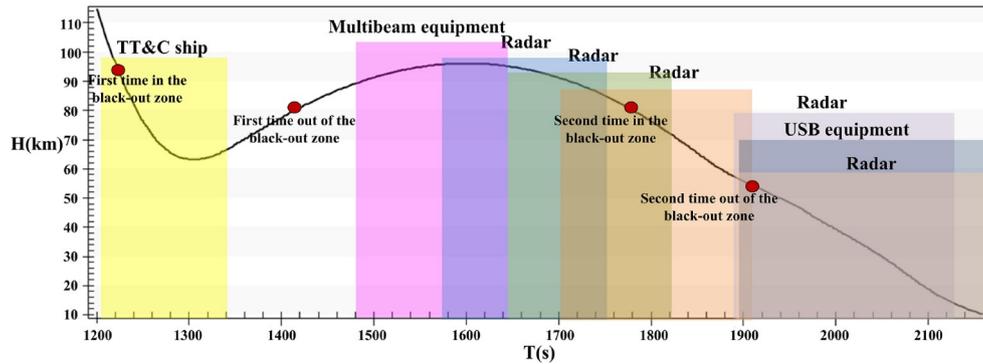


图 5 (网络版彩图)再入返回测量链无线电设备理论跟踪覆盖示意

Figure 5 (Color online) Radio tracking coverage schematic of the re-entry measurement chain.

成了搜索回收任务, 为后续其他返回器航天器的回收任务积累了成功经验<sup>[14]</sup>.

### 3.8 样品处理与制备设计

月背样品返回地球后, 需对样品进行交接转运、解封、分样、存储和制备等. 样品存储处理流程包括月背样品解封处理、样品分样和样品制备等设计与验证工作.

对于月背样品解封处理设计与验证, 开展了全流程样品解封试验. 利用密封封装装置结构件开展模拟解封, 验证封装装置预处理、转移至过渡舱、转移至操作舱、转移至解封舱、解封后返回操作舱等一系列操作流程, 检查样品解封操作试验流程的正确性、合理性和有效性, 岗位操作人员配合的协调性和匹配性. 验证结果表明, 样品解封操作能够顺利将样品封装装置解封.

对于分样操作, 在封装装置解封区, 利用解封装置操作台对处于完整包装状态的月球样品封装装置进行解封和样品收集. 在解封操作台内对收集到的铲取样和钻取样进行描述, 建立月球样品的原始信息档案, 根据不同的需要将样品分为永久存储样、异地备份存储样和科学研究样, 铲取样分样如图6所示. 样品分样操作验证结果表明能够顺利分样.

样品制备包括科学研究样的制备和工程展示样的制备. 科学研究样的制备工作确定了分选样制备和光片制备: 分选样制备过程包括岩屑样挑选、单矿物颗粒挑选、玻璃颗粒挑选; 光片制备过程包括岩屑样光片制备、粉末光片制备.

样品存储分为临时存储和永久存储. 其中, 钻取样平铺于临时存储装置内带刻度的样品槽内, 根据需要再进行分样、处理和制备操作; 铲取样分样后获得的永久存储样送入永久存储区进行保存, 其他类型样品送入临时存储区, 进行进一步分样、处理和制备.

### 3.9 月面智能成像搭载项目设计

为获取嫦娥六号月背工作影像提高任务展示度, 同时验证月面智能成像等新技术, 搭载了质量约4.5 kg 的智能微小机器人.

智能微小机器人本体由结构与机构系统、智能计算与通信系统、感知测量系统、电源与系统管理系统和热控系统组成. 采用箱式结构和四轮独立驱动方式, 通过差速实现整机转向. 越障能力大于5 cm, 爬坡能力大于15°, 设计最大移动速度为360 m/h. 受限于质量功耗等严格资源约束, 机器人采样嵌入式智能计算与通



图 6 (网络版彩图)铲取样分样

Figure 6 (Color online) Surface sample sub-sampling.

信系统, 实现智能计算、系统管理及与着陆器无线通信, 并配备了两台高集成感知传感器和1台纳型太阳敏感器。两台感知传感器分别用于感知月面地形识别和对着陆器和上升器组合体成像, 两台感知传感器对称安装。

着上组合体完成月球背面采样任务之后, 智能微小机器人与着陆器释放分离, 自主启动并建立与着陆器的无线通信, 通过环境感知和交互, 自主移动到着陆器成像位置, 并对着陆器和上升器组合体进行智能取景成像, 获得着陆器和上升器在月面的工作合影照片, 如图7所示。

通过搭载智能微小机器人, 开展智能取景成像, 验证了月面地形感知、自身定位定姿、任务及路径规划、安全运动控制等自主智能技术, 实现了技术创新验证和提高工程展示度的双赢。

## 4 任务研制与关键试验验证

### 4.1 研制过程

2022年8月, 嫦娥六号任务全面启动, 一步进入正样研制阶段。针对嫦娥六号任务飞行阶段多、工作模式复杂、飞控事件密集、月背工作阶段对地不可见, 完成全过程任务链分析, 明确整个任务过程中动作的时序、系统间协同和鹊桥二号中继星支持要求, 打通了任务飞行的全过程, 覆盖了影响任务成败的重大问题, 实现了各系统在工程层面的集成与全景式分析, 完成大系统间接口设计、技术协调与对接试验验证。

探测器系统完成轨道设计与控制、月背采样设



图7 (网络版彩图)着陆组合体月面工作影像  
Figure 7 (Color online) Imagery of the Chang'e-6 assembly operating on the moon.

计、月背起飞上升设计、国际载荷搭载接口设计与验证、产品寿命保证和产品贮存保证等研制工作, 完成探测器电性能综合测试、电磁兼容试验、力学试验、热试验等常规试验和采样封装等专项试验, 于2024年12月通过出厂评审。运载火箭系统完成发射弹道设计、任务总体及各分系统方案设计、产品投产研制与总装、火箭出厂测试、产保检查等研制工作, 于2024年3月完成出厂评审; 发射与回收系统、测控系统和地面应用系统完成适应性改造后, 于2024年2~4月通过执行任务能力评估。

### 4.2 关键试验验证

为验证总体设计方案的合理性和可靠性、各系统的功能性能及系统间联合工作的匹配性、协调性和正确性, 设计并组织实施了十一项关键试验, 针对月背采样设计开展了月背采样大系统协同试验, 针对月背中继通信设计开展了探测器与鹊桥二号中继星多个阶段的对接试验及任务全过程1:1无线联试。以下对代表性较强的试验进行阐述。

#### (1) 探测器与鹊桥二号中继星对接试验

设计了探测器与鹊桥二号中继星对接试验, 包括鹊桥二号中继星与嫦娥六号轨道器、上升器、着陆器的中继通信接口有线和无线联试, 鹊桥二号入轨后与地面尚未发射的嫦娥六号探测器天地对接联试, 验证鹊桥二号中继星与嫦娥六号轨道器、上升器、着陆器的中继通信设备联合工作的匹配性、协调性和正确性。

#### (2) 任务轨道仿真与全过程1:1无线联试

针对环月逆行轨道、三脉冲近月制动、43.2°倾角再入返回轨道, 开展了月背软着陆着陆位置偏差、着陆速度/姿态散布、着陆推进剂消耗、月背起飞上升入轨偏差、起飞上升航迹安全性、再入返回航迹散布、飞行程序安排合理性等仿真验证, 确保全过程飞行方案合理可行。

设计了任务全过程1:1无线联试, 通过静态联试和动态联试验证天地大回路飞控方案、飞行程序、故障处置预案的正确性和合理性, 器地接口、器星接口及飞控软件的匹配性, 测控系统、探测器系统、地面应用系统和鹊桥二号中继星联合工作的协调性和匹配性。

#### (3) 月背采样仿真与大系统协同试验

针对月背自主能力提升, 开展复杂场景下采样封

装过程的数字仿真,验证了机构运动智能化预测、非标称工况采样效率、机械臂运动路径优化、采样工作序列组合化使用等关键设计的正确性。

设计了月背采样大系统协同试验,以探测器采样验证器为受控对象,进行实际地形和工装条件下典型非标称工况月背采样封装验证,通过按照任务标称飞行程序开展动态联试,包括机械臂运动控制、采样区地形恢复、采样点及采样策略确定、钻取采样封装、表取采样封装等。对北京中心和支持中心之间主备份光纤通信链路的连通性、北京中心向支持中心进行多站遥测数据转发、北京中心和支持中心之间进行图像处理结果互发、异常情况下地面协同工作流程的合理性与时效性等进行验证。

#### (4) 国际载荷接口试验

设计了巴基斯坦立方星分离专项试验,包括3次标称工况和5次拉偏工况,验证立方星与探测器接口的匹配性和分离过程的安全性<sup>[15]</sup>。设计了立方星与测控系统对接试验及天地1:1无线联试,测控体制的正确性及天地各系统联合工作的协同性,确保巴基斯坦立方星在月球轨道上能够顺利与探测器分离,并完成既定在轨成像任务。

设计了国际载荷接口研制试验。初样阶段,月表负离子分析仪、氦气探测器电性件分别与数据转换单元开展电接口联试,验证了设计的合理性、数据转换单元供电及控制功能的满足性、电接口的匹配性与通讯协议的正确性;正样阶段月表负离子分析仪、氦气探测器正样件与数据转换单元再次开展接口联试,验证了正样接口实现的正确性和匹配性。正样阶段完成了立方星供配电安全接口检查,确认探测器与立方星供电接口满足要求。

## 5 发射实施结果

### 5.1 发射奔月

2024年5月3日,嫦娥六号探测器在海南文昌航天发射场由长征五号遥八运载火箭发射升空。运载火箭将探测器成功送入近地点197.8 km、远地点364720 km的地月转移轨道。火箭在大雨中准时起飞、精确入轨,充分验证了全天候、高可靠发射能力。

探测器于5月8日实施第一次近月制动进入近月点高度187.5 km、远月点高度8817.3 km、周期12 h的环

月椭圆轨道,并在远月点释放了巴基斯坦立方星。立方星成功开展了在轨对月成像,完成既定任务目标。5月9日探测器实施第二次近月制动进入近月点高度163.6 km、远月点高度2412 km、周期4 h的椭圆停泊轨道。5月21日实施第三次近月制动进入近月点高度176.3 km、远月点高度225.7 km、平均轨道高度约200 km、周期约127 min的环月圆轨道。在环月飞行期间探测器与鹊桥二号中继星进行了中继对通测试。

5月30日,探测器在环月圆轨道上完成着上组合体和轨返组合体分离,分离后轨返组合体继续环月飞行,着上组合体于5月31日和6月1日,通过两次降轨进入近月点高度11.7 km、远月点高度207.5 km的椭圆轨道。

### 5.2 月背着陆与采样

2024年6月2日6时9分,着上组合体从高度为11.7 km的近月点开始动力下降,历经主减速段、接近段、悬停避障段、缓速下降段于6时23分成功软着陆于月球背面南极-艾特肯盆地西经153.9°、南纬41.6°,如图8所示。

着上组合体着陆后完成初始化后完成钻取采样、表取采样及样品封装工作。开始钻取采样前月壤结构探测仪开机探测月表浅层结构,为制定钻取采样策略提供参考依据。6月2日10时05分开始钻取采样工作,钻进深度约1.1 m时遭遇碎石层,考虑后续任务安排等因素后停止钻进,12时32分完成钻取采样及样品封装。钻取采样结束后月球矿物光谱仪、法国氦气探测器、欧空局月表负离子分析仪等科学探测仪器按计划开展了就位科学探测及数据传输,布设在月球背面的意大

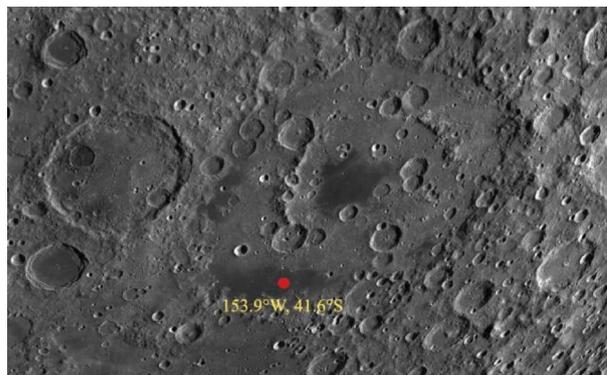


图8 (网络版彩图)嫦娥六号着陆点  
Figure 8 (Color online) Chang'e-6 landing site.



图9 (网络版彩图)表取采样影像  
Figure 9 (Color online) Surface sampling imagery.

利激光角反射器可以与其他国内外月球探测任务联合开展测距与定位研究。

6月2日17时25分表取采样装置开始表取工作,先后在3个采样点进行了8次表取采样,6月3日6时10分完成表取采样与样品封装工作,表取采样影像如图9所示。表取采样完成后,国旗展示系统成功在月球背面首次完成国旗动态展示。在着上组合体月面工作期间,轨返组合体通过调相机动,到达平均轨道高度为200 km的圆轨道合适相位等待交会交接。

### 5.3 月背起飞与交会对接

2024年6月4日7时38分,上升器携带月球样品密封容器从月球背面起飞,约6 min后进入近月点15 km、远月点180 km的椭圆轨道,在地面测控站的支持下上升器实施四次变轨,准确到达轨返组合体前方50 km、上方10 km的预定交班位置,轨道器根据相对导航收敛状态自主进入近程寻的段,完成与上升器交会对接,月球样品密封容器从上升器转移至返回器内,完成样品转移,交会对接与样品转移影像如图10所示。随后轨返组合体分离上升器及对接舱。

### 5.4 月地转移与再入返回

轨返组合体于2024年6月19日和6月20日分别实施两次月地入射机动进入月地转移轨道,6月25日,在距离地面高度5000 km时轨道器和返回器分离,返回器经历初次再入、自由飞行和二次再入后,在距离地面10 km高度时打开降落伞,开伞点控制精度达到278 m,着陆于内蒙古四子王旗着陆场,搜索回收力量完成对返回器的回收,嫦娥六号任务圆满成功。轨道器拉起后前往日地拉格朗日L2点轨道开展拓展试验。

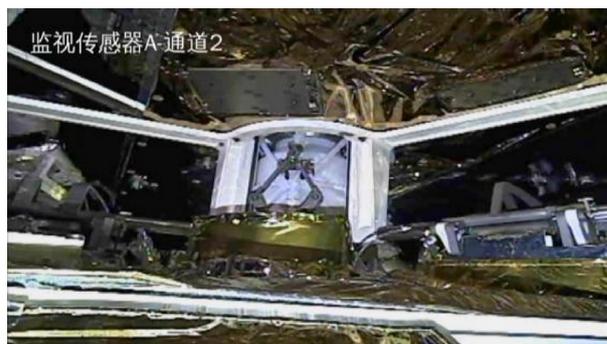


图10 (网络版彩图)交会对接与样品转移  
Figure 10 (Color online) Rendezvous and docking as well as sample transfer.

## 6 结论

嫦娥六号任务在人类历史上首次实现了月球背面采样返回,标志着月球探测技术的重大突破,是人类太空探索的重要里程碑,为人类了解月球背面的地质结构、成分及演化历史提供了宝贵的月背样品和数据。

通过对嫦娥六号月背样品的研究,发现了月球背面样品中独特的矿物组合和稀有元素分布特征,揭示了首份月背古磁场信息<sup>[16]</sup>,确定了28亿年和42亿年两期次玄武岩岩龄<sup>[17,18]</sup>,揭示了月背岩浆活动记录,为理解月球背面和正面的显著地质差异开辟了新视角<sup>[19,20]</sup>。嫦娥六号将继续引领月球样品研究的“嫦娥时代”,为更加深入和全面地认识月球作出重要贡献。

嫦娥六号通过国际合作,在国际首次开展了月背负离子探测,确认月表附近存在负离子层,月表负离子的密度约为0.08个/cm<sup>3</sup>;国际首次开展了月球背面氦气探测,发现氦及其衰变产物的信号。

嫦娥六号任务的成功实施展现了我国在航天技术领域的自主创新能力,进一步提升了我国在国际航天领域的地位和影响力。习近平总书记指出:“嫦娥六号完成了人类历史上首次月球背面采样,突破了多项关键技术,是我国建设航天强国、科技强国取得的又一标志性成果,是我国探月工程的重要里程碑。”“充分展现了中国人的志气、骨气和底气。”([https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content\\_6975952.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content_6975952.htm))。嫦娥六号任务通过高质量国际合作,促进了我国在国际航天领域的交流与合作,共同推动了人类太空探索事业的发展,为我国与其他国家共同构建人类命运共同体提供了新的契机和平台。

## 参考文献

- 1 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 (in Chinese). *Aerospace China*, 2024, 7: 7–13 [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. *中国航天*, 2024, 7: 7–13]
- 2 Hu H, Pei Z Y, Li C L, et al. Overall design of unmanned lunar sampling and return project—Chang'e-5 mission (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2021, 51: 1275–1286 [胡浩, 裴照宇, 李春来, 等. 无人月球采样返回工程总体设计——嫦娥五号任务. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51: 1275–1286]
- 3 Hu H. China's First Lunar Sample Return Mission (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2022 [胡浩. 中国首次月球采样返回工程. 北京: 中国宇航出版社, 2022]
- 4 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]
- 5 Di K C, Xiao Z Y, Lin Y T, et al. Formation of south Pole-Aitken Basin and early impact history of the Moon (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2022, 36: 880–887 [邸凯昌, 肖智勇, 林杨挺, 等. 月球南极——艾特肯盆地的形成与早期撞击历史. *中国科学基金*, 2022, 36: 880–887]
- 6 Jia Z, Chen J, Kong J, et al. Geologic context of Chang'e-6 candidate landing regions and potential non-mare materials in the returned samples. *Icarus*, 2024, 416: 116107
- 7 Zeng X, Liu D, Chen Y, et al. Landing site of the Chang'e-6 lunar farside sample return mission from the Apollo basin. *Nat Astron*, 2023, 7: 1188–1197
- 8 Zhou C Y, Wang C, Li H J, et al. Design of the payload subsystem of Chang'e-5 lunar explorer (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2021, 8: 290–298 [周昌义, 王赤, 李慧军, 等. “嫦娥五号”探测器有效载荷分系统设计. *深空探测学报*, 2021, 8: 290–298]
- 9 Meng Z F. Innovation and inspiration of Chang'e-6 mission trajectory design (in Chinese). *Aerospace China*, 2024, 7: 14–21 [孟占峰. “嫦娥”号任务轨道设计技术创新与启示. *中国航天*, 2024, 7: 14–21]
- 10 Meng Z F, Gao S, Zhao Q, et al. Chang'e-6 mission planning leveraging geometry approach (in Chinese). *Chinese Space Sci Technol*, 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]
- 11 Zhou W Y, Gao B Y, Dong T S, et al. Matching design of trajectory with Chang'e-6 mission and flying practice of Queqiao-2 satellite (in Chinese). *Chinese Space Sci Technol*, 2024, 44: 16–22 [周文艳, 高博宇, 董姍姍, 等. 鹊桥二号轨道与嫦娥六号任务匹配性设计和飞行实践. *中国空间科学技术*, 2024, 44: 16–22]
- 12 Sheng R Q, Meng Z F, Zhao Y, et al. Analysis and key design of lunar far-side robotic sampling and return mission (in Chinese). *Chinese Space Sci Technol*, 2024, 44: 1–14 [盛瑞卿, 孟占峰, 赵洋, 等. 月球背面无人自动采样返回任务分析与要点设计. *中国空间科学技术*, 2024, 44: 1–14]
- 13 Huang L, Li H T, Sun W, et al. System design and mission implementation of TT&C scheme of Chang'e-6 mission (in Chinese). *Aerospace China*, 2024, 7: 26–33 [黄磊, 李海涛, 孙威, 等. “嫦娥”六号任务测控系统方案设计与任务实施. *中国航天*, 2024, 7: 26–33]
- 14 Sun W, Li C Y, Ye J S. Design and implementation of the landing site system for the Chang'e-6 lunar far side sampling and return mission (in Chinese). *Aerospace China*, 2024: 34–39 [孙威, 李晨阳, 叶建设. “嫦娥”六号月背采样返回任务着陆场系统设计与实现. *中国航天*, 2024: 34–39]
- 15 Wu S F, Qamarul I, Zeng X Q. Comprehensive overview of the ICUBE-Q (in Chinese). *Aerospace China*, 2024: 45–56 [吴树范, Islam Qamarul, 曾小勤, 等. 巴基斯坦立方星ICUBE-Q任务综述. *中国航天*, 2024: 45–56]
- 16 Cai S, Qi K, Yang S, et al. A reinforced lunar dynamo recorded by Chang'e-6 farside basalt. *Nature*, 2024, doi: 10.1038/s41586-024-08526-2
- 17 Zhang Q W L, Yang M H, Li Q L, et al. Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts. *Nature*, 2024, doi: 10.1038/s41586-024-08382-0
- 18 Cui Z, Yang Q, Zhang Y Q, et al. A sample of the Moon's far side retrieved by Chang'e-6 contains 2.83-billion-year-old basalt. *Science*, 2024, 386: 1395–1399
- 19 Li C, Hu H, Yang M F, et al. Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'e-6 mission. *Natl Sci Rev*, 2024, 11: nwae328
- 20 Zhang Q, Yang M H, Li Q L, et al. Chang'e-6 basalts reveal magmatic activities on the lunar farside (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 5076–5078 [张谦, 杨慕涵, 李秋立, 等. 嫦娥六号玄武岩揭秘月背岩浆活动. *科学通报*, 2024, 69: 5076–5078]

## Overall design and implementation of Chang'e-6 mission

HU Hao<sup>1</sup>, WANG Qiong<sup>1</sup>, HUANG Hao<sup>2</sup>, ZUO Wei<sup>3</sup>, GE Ping<sup>1</sup>, HU ZhenYu<sup>1</sup>, HU HaoDe<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>4</sup>, WANG JianMing<sup>5</sup>, CHEN YanHe<sup>6</sup>, SUN Ji<sup>2</sup>, LI ChenYang<sup>4</sup> & LI HuiJun<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China

<sup>2</sup> China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

<sup>3</sup> National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

<sup>4</sup> Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

<sup>5</sup> China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

<sup>6</sup> Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China

<sup>7</sup> National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

The Chang'e-6 mission has achieved the first human sample return mission from the far side of the moon. This article proposes an overall design concept for designing relay communication links to support lunar background measurement and control, optimizing detector design to adapt to lunar background sampling, enhancing system reliability, and ensuring mission success, addressing the challenges of high task complexity, difficult product assurance, high flight control requirements, tight development cycles, and complex and diverse implementation risks. It focuses on the design and verification of key task links such as sampling area design, lunar background sampling design, and international cooperation project design, and outlines the development and implementation process and in orbit flight results.

**Chang'e-6, overall design, lunar farside sampling, lunar farside ascender lift-off, international cooperation**

doi: [10.1360/SST-2025-0028](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0028)