无人月球采样返回工程总体设计 ——嫦娥五号任务

胡浩^{1*}, 裴照宇¹, 李春来², 彭兢³, 李东⁴, 董光亮⁵, 刘鹰⁵, 任俊杰¹, 王琮¹,
庞涪川¹, 高磊¹

1. 国家航天局探月与航天工程中心, 北京 100190;

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

3. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

4. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;

5. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

* E-mail: huhaotanyue@163.com

收稿日期: 2021-04-12; 接受日期: 2021-05-25; 网络版发表日期: 2021-10-25

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 嫦娥五号是我国复杂度最高、技术跨度最大的航天系统工程, 本文阐述了嫦娥五号的任务目标和主要技术指标, 从系统组成、设计约束和飞行过程3个方面介绍了工程技术方案, 重点研究了地外天体采样返回工程系统方案、表取和钻取两种采样模式等7个工程取得的主要技术创新, 分析了再入返回飞行试验、月面着陆起飞综合验证试验等8项涉及任务匹配性、协调性和正确性的大型试验, 可为后续其他地外天体采样返回任务提供重要参考。

关键词 嫦娥五号, 月面采样, 月面起飞, 交会对接, 跳跃式再入

1 引言

嫦娥五号工程面临“新研火箭、新研探测器、新建发射场”的情况, 且具有飞行阶段多、关键环节多、设计约束多等特点^[1], 是迄今为止我国复杂度最高、技术跨度最大的航天系统工程, 是探月工程重大科技专项的收官之作。

嫦娥五号工程高起点确定功能、性能指标和工程

方案, 集成我国最高水平航天技术基础^[2], 在继承我国航天工程经验基础上, 突破月面采样、月面起飞、月球轨道交会对接、月地高速再入返回、月球探测科学仪器等核心关键技术, 开展了大量的设计分析和地面验证试验, 并创新了技术、计划和质量管理方法。2020年12月17日, 嫦娥五号返回器携带1731 g月球样品安全着陆于四子王旗预选着陆区, 首次实现我国地外天体采样返回。

引用格式: 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

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, doi: [10.1360/SST-2021-0155](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0155)

工程的圆满成功, 实现了我国航天器研制、特种大型试验验证、深空测控通信能力的全面跃升, 带动了信息、微机电、动力、新材料等领域一批新技术和产业化发展, 完善我国的月球探测航天工程体系, 形成重大项目实施的科学的工程管理办法。这可以为后续载人登月和深空探测工程服务^[3], 并且具有重要的经济效益和社会效益。

2 任务目标与主要技术指标

2.1 科学目标

着陆区的现场调查和分析。开展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; 月球样品的分析与研究。对月球样品进行系统、长期的实验室研究, 分析月壤的结构、物理特性、物质组成, 深化月球成因和演化历史的研究。

2.2 工程目标

突破窄窗口多轨道装订发射、月面自动采样与封装、月面起飞、月球轨道交会对接、月地转移、地球大气高速再入、多目标高精度测控、月球样品储存等关键技术, 提升我国航天技术水平; 实现首次地外天体自动采样返回, 推进我国科学技术重大跨越; 完善探月工程体系, 为载人登月和深空探测奠定一定的人才、技术和物质基础。

2.3 主要技术指标

探测器: 发射质量不大于8200 kg; 收拢状态尺寸直径4.414 m×7.155 m。

运载能力: 长征五号运载火箭二级滑行时间1000 s时, 地月转移轨道运载能力不小于8200 kg。

发射: 在海南文昌发射场实施发射, 射向90°~110°, 具备推迟发射保障能力。

月面工作: 采样区域月球正面南北纬15°~45°之间; 工作时间约2 d。

测控与回收: 落点区域内蒙古四子王旗; 搜寻到返回器的时间不超过48 h; 测控覆盖率基本包括在地月转移段、月面工作段、月地转移段重要阶段。

样品处理: 样品回收后运输至指定地点, 妥善保存, 组织开展科学研究、展示及容灾备份。

3 工程技术方案

3.1 总体方案

根据前期论证和研究, 在运载火箭能力足够, 且返回样品及返回器质量较大, 从提高经济性和降低任务风险的角度出发, 重点考虑一次发射月球轨道交会对接方案^[4], 即在中国文昌航天发射场, 使用长征五号运载火箭, 将月球探测器(含轨道器、着陆器、上升器、返回器)送入地月转移轨道, 在地面测控支持下, 探测器经过地月转移、近月制动、环月飞行、月面软着陆、样品采集和科学探测、月面起飞、月球轨道交会对接、月地转移、地球再入、着陆回收等过程, 完成月面采样返回任务, 并开展科学研究。

整个任务过程包含两种采样方式、两次样品转移、两次发射与上升、两次地球大气再入、一次交会对接、六次分离, 是我国当前最复杂的航天系统工程。

3.2 系统组成

沿用探月工程任务组织模式, 嫦娥五号由工程总体和探测器系统、运载火箭系统、测控与回收系统、发射场系统、地面应用系统组成, 整个任务以探测器系统为主线开展研制工作。

探测器系统: 新研由着陆器、上升器、轨道器和返回器组成的四器组合式月球探测器(组成示意图见图1), 四器分别具备独立飞行能力及月面着陆、采样、上升、对接、返回等功能, 在地面测控与回收系统、应用系统支持下, 相互配合、协同工作, 完成月面采样返回任务。

图1 嫦娥五号探测器组成示意图

Figure 1 Schematic diagram of CE-5 probe.

运载火箭系统: 选用我国新一代大型运载火箭长征五号作为运载火箭(图2).

发射场系统: 选择中国海南文昌航天发射场实施发射任务, 经长征五号遥一、遥二、遥三发射试验任务验证, 已具备大型低温运载火箭运输、吊装、测试、加注、发射和探测器的技术勤务保障能力. 图3给出了该发射场布局示意图.

测控与回收系统: 新建阿根廷深空站, 形成我国完整的全球深空测控网; 建设X波段相控阵雷达等设

施、采用三站联测等技术, 形成我国高速再入返回测量分系统; 选用近地航天测控网、VLBI测轨分系统、国际联网测控站参加测控任务. 选用我国内蒙古四子王旗着陆场及搜索回收力量回收返回器. 测控与回收系统组成及全球布局情况见图4.

地面应用系统: 以地面应用系统科学应用中心和密云、昆明数据接收站为基础, 进行相关设备改造, 实施科学支持任务; 在科学应用中心新建月球样品实验室, 开展月球样品存储、处理、研究.

3.3 任务设计主要约束

(1) 发射窗口与轨道设计

在我国探月工程中, 嫦娥五号任务发射窗口设计的约束最多、设计难度最大. 相比以往的月球环绕和月面软着陆任务, 由于增加了月面起飞上升、月球轨道交会对接和样品转移、月地转移入射、月地转移和地球再入返回部分的约束, 还需考虑月面工作、火箭/发射场的发射组织能力、地面测控通信和在轨飞控等一系列约束条件, 考虑任务推迟带来的地月相对几何关系在不同年份的变化, 极大增加了搜索任务可行发射窗口的难度.

针对上述难点, 提出了一种基于飞行任务全局特性几何分析和数值分析相结合的发射窗口设计方法. 通过任务几何分析, 建立了再入航程与月球赤纬、采样点纬度与月面高度角、采样点经度与飞行任务时序等之间的关系; 在全局任务几何特性分析基础上, 编制

图 2 长征五号运载火箭示意图

Figure 2 Picture of CZ-5 launch vehicle.

图 3 中国文昌航天发射场布局示意图

Figure 3 Picture of WenChang space launching site.

图 4 嫦娥五号测控与回收系统示意图
Figure 4 Schematic diagram of TT&C system for CE-5.

了发射窗口快速搜索程序, 基于全过程飞行轨道和设计约束条件的数字化模型, 设计了一种多级筛选机制, 采用优化方法提高窗口搜索效率, 设计了满足所有约束的全任务轨道. 在任务实施的最后阶段, 为工程总体开展弹道/轨道拼接与迭代、大系统接口文件的技术状态确定和固化提供了不可或缺的支撑.

(2) 采样区选择

嫦娥五号采样区(着陆区)的选择要综合考虑任务科学目标的实现, 和轨道、光照、热控、测控支持等工程设计约束, 以及月面上升对月壤地质特性的要求, 是一个多约束的问题, 其分析设计过程如图5所示.

针对采样区位置与工程实现约束强耦合的特点, 通过飞行任务分析, 综合全任务飞行时间、月面工作测控与光照条件、动力下降和着陆安全地形条件以及采样点位置对变轨和起飞上升速度增量需求等因素的影响和量化分析, 对全月面备选采样点进行工程实现难度量化评级, 确定具备工程可实现性的可选区域. 随后, 从这些区域的月球样品年龄等方面对科学价值进行权衡, 综合发射窗口、轨道设计和任务分析结果, 选择月球正面北纬 $41.5^{\circ}\sim 44.5^{\circ}$ 、西经 $56.7^{\circ}\sim 64.7^{\circ}$ 风暴洋东北侧区域作为月面着陆和采样区, 如图6所示.

(3) 重量分配与控制

因月面取样、月面上升、月球轨道交会等动作

图 5 嫦娥五号采样区确定流程示意图
Figure 5 Determination process for CE-5's sampling area.

多, 探测器由四器组成且携带设备多. 在火箭运载能力严重制约的情况下, 探测器质量严苛受限, 需从系统设计和单机设计方面开展工作, 以满足探测器系统重量

图 8 嫦娥五号月面软着陆轨道示意图

Figure 8 Schematic diagram of CE-5's descent orbit to the Moon surface.

(3) 月球起飞上升

上升器初始推重比、目标轨道近月点高度对燃耗影响较大, 而目标轨道远月点高度、倾角的影响则小得多^[7]. 综合后续交会对接需求, 上升器目标轨道近月点设计为15 km. 着上组合体完成月面工作后, 上升器点火起飞进入环月轨道; 轨道器与上升器精准对接并完成样品转移后实施分离; 在月面上升段, 上升器3000 N发动机点火、起飞并与着陆器安全分离, 在制导导航与控制分系统控制下加速上升, 进入15 km×180 km的上升目标轨道. 月面上升轨道的起点是月面采样点, 终点是15 km×180 km轨道的近月点.

(4) 月球轨道交会对接

交会对接段包括远程导引段、近程导引段和对接与样品转移段三个子飞行阶段. 其中远程导引段包括轨道器调相和上升器远程导引, 由地面实施定轨和控制, 在交班点时刻, 上升器飞至210 km高度、与轨道器共面的圆轨道, 位于轨道器前方50 km、上方10 km的位置, 满足转入近程导引的要求. 交会对接轨道设计见图9.

近程导引段和对接与样品转移段根据近程导引段初始条件, 按照制导控制律自动实现. 近程导引过程如图10所示.

(5) 月地转移

当月地转移窗口打开后, 轨返组合体达到环月轨道合适相位, 实施两次月地转移入射机动, 间隔约1 d, 第一次机动后进入周期约8 h的大椭圆轨道, 在该轨道上飞行3圈后, 探测器实施第二次机动, 进入月地转移

图 9 嫦娥五号月球轨道交会对接远程导引示意图

Figure 9 Schematic diagram of CE-5's long range guidance for rendezvous and docking.

轨道. 在到达轨返分离点(高度约5000 km)时, 轨道器与返回器分离, 轨道器完成规避机动, 返回器惯性飞行. 在月地转移过程中需要安排2~3次中途修正, 保证再入点参数满足要求. 对两次中途修正的速度增量与修正时机关系的研究表明, 尽早修正有利于节省燃料, 且第二次修正的速度增量远小于第一次^[8], 且满足返回任务度落点及再入航程的要求.

(6) 再入返回

12月17日, 在距离地面约5000 km, 返回器、轨道器分离, 返回器经滑行、第一次再入地球大气并跃起、自由飞行、第二次再入地球大气等飞行阶段, 在内蒙古四子王旗预定区域安全着陆.

再入段采用升轨返回方式, 再入航程需求范围为5600~7100 km. 受航程需求范围约束, 再入段采用半弹道跳跃式再入弹道方案. 跳跃式再入返回过程如图11所示.

4 七个方面主要技术创新

4.1 创造性地设计了地外天体采样返回工程系统方案

设计了四器组合飞行、月面采样封装、月面起飞上升、无人环月对接、高速跳跃返回、国内回收的工

图 10 嫦娥五号月球轨道交会对接近程导引示意图

Figure 10 Schematic diagram of CE-5's short range guidance for rendezvous and docking.

图 11 嫦娥五号跳跃式再入返回示意图

Figure 11 Schematic diagram of CE-5's jump reentry.

程系统方案。有力推动了长征五号火箭和文昌航天发射场的研制建设, 形成了全球布局、全天时的中国深空测控网和再入测量走廊, 新建了一系列高水平试验设施和月球样品实验室, 形成了地面试验验证系统, 构建了地月往返航天工程体系。

4.2 国际首次提出遥操作表取、钻取的采样方案

突破了月面钻取、表取、样品转移及精准操控的技术, 建立了三位一体的天-地交互操作工作模式, 实现了高可靠、多样性的预定采样目标, 采样模式如图 12 所示。同时通过原位探测, 建立了月球样品现场数据与地面分析数据的关联关系, 为相关月球科学研究提供了更丰富、全面的有力数据支撑。

4.3 首次提出了环月两器通信、抓捕式无人对接和转移机构自主样品转移的方案

创新研制了抱爪式对接机构、棘爪式转移机构和高精度轻小型低能耗对接敏感器, 对接初始条件控制精度为厘米级, 在轨实现了世界首次无人月球轨道自主交会对接和样品转移, 大幅提升了高复杂度任务的自主能力和协同能力。其中, 抱爪式对接机构如图 13 所示, 左侧为被动机构, 右侧为主动机构。棘爪式转移机构如图 14 所示。

4.4 创新设计了月面起飞技术方案

提出了着陆组合降落/单独起飞、天地联合定位、

图 12 嫦娥五号三位一体采样模式示意图
Figure 12 Schematic diagram of CE-5's sampling control mode.

图 13 对接机构示意图
Figure 13 Schematic diagram of CE-5's docking mechanism.

定姿、上升后快速测定轨的月面起飞实施方案, 飞行过程如图15所示. 突破两器小间隔射流等复杂流场影响、月面起飞对准、精确入轨支持等关键技术. 完成了月面零窗口起飞、入轨精度优于5 km, 完美实现了我国探测器首次地外天体表面起飞上升和高精度入轨.

4.5 创新设计高精度、大覆盖的测控方案

提出了集国内优势、国际布局、天地一体化的全天时、全天候、多目标、精确测量控制通信的测控方案, 突破了多波束电扫捷变捕获与机扫跟踪、高速再入小目标快速搜索捕获与多域联合检测等关键技术,

图 14 样品转移机构示意图
Figure 14 Schematic diagram of CE-5's sample transfer mechanism.

建立了全球布局的深空测控网, 实现了对月球探测器X频段、多目标90%以上的测控覆盖, 月球轨道交会对接远程导引半长轴精度优于30 m; 建立了我国首个行星际返回再入测控走廊, 实现了第二宇宙速度再入返回目标近连续可靠跟踪.

4.6 国内首次构建月球样品处理系统

突破了高真空与高纯氮气环境交替使用、高真空环境解封和微量气体采集等关键技术, 形成了月球样品处理制备和存储的标准规范. 国内首次建成了集存储、解封操作、物性分析等功能组成, 低损耗的样品一体化解封、操作、分析系统, 具备开展月球样品的粒径粒形、真密度、比表面积参数、固结系统、矿物

图 15 月面起飞过程示意图

Figure 15 Schematic diagram of CE-5's taking off on the Moon.

组成、主量和微量元素等分析检测能力, 实现了无污染、低损耗样品处理。

4.7 创新设计了高适应性的地月转移火箭发射弹道

提出了运载火箭装订 5 条弹道, 保证测控和发射窗口的方案。针对地月关系、落月点光照条件、返回走廊以及运载、探测器、测控等能力约束, 完成了任务轨道的设计; 发明了箭上装订多条弹道间隔发射奔月轨道的设计方法, 满足了 50 min 内任意轨道 ± 5 min 窄窗口发射的要求, 提高了任务实施的可靠性; 建立了高精度地月发射轨道计算、任务全过程轨道快速重构模型, 构建了任务分析与评估系统, 解决了发射窗口与轨道拼接设计约束多、涉及系统多、工作量大等难题, 大幅提升了设计效能。

5 八项大型试验

为充分验证嫦娥五号工程各系统功能、性能和可靠性, 以及各系统间联合工作的匹配性、协调性和正确性, 系统性开展了工程任务验证方案设计, 共包含 78 项大型试验, 其中跨系统大型试验 15 项、各系统大型试验 63 项, 形成大型试验矩阵, 并制定组织实施细则, 从试验

准备、试验组织、试验总结、质量保证等方面确保试验效果。这些大型试验条件建设、试验方案的设计本身就是复杂的科研任务, 建设规模、试验能力、技术指标很多达到了国际先进水平。篇幅所限, 以下就创新性、重要性、代表性较强的 8 项试验进行阐述。

5.1 再入返回飞行试验

嫦娥五号返回器以第二宇宙速度、半弹道跳跃式再入返回地面在我国是第一次, 地面试验验证条件欠缺且难以有效模拟飞行环境的影响, 通过月地高速再入返回飞行试验, 突破了月地高速再入返回技术^[9], 解决了对地球大气特性的认识尚不充分、模型不完备, 返回器高速再入条件下的气动、热防护与再入环境模型掌握不全面等难题。

5.2 月面采样专项试验及大系统协同试验

验证采样封装方案设计的正确性与合理性; 验证采样封装相关产品功能与性能指标符合性; 验证采样封装相关产品之间的接口匹配性; 开展月面采样封装工作程序演练与优化开展采样封装分系统产品功能与性能适应能力探索; 开展采样封装故障模式研究, 探索影响因素与排故措施等。试验现场如图 16 所示, 其中, 气球是用于抵消 5/6 的重力, 为机械臂提供与月球表面相当的力学环境。

5.3 月面着陆起飞综合验证试验

考核软着陆过程中着陆上升组合体对着陆安全区域的识别能力及避障控制性能; 验证软着陆过程中制导导航与控制分系统(GNC)对着陆上升组合体的综合

图 16 嫦娥五号采样试验现场图

Figure 16 Picture of CE-5's sampling test site.

控制能力; 验证着陆上升组合体的最终月面着陆姿态, 考核着陆器的支撑特性; 验证上升器的起飞稳定性; 综合演练软着陆及起飞工作过程, 验证月面软着陆及起飞程序设计的正确性. 试验设施见图17.

5.4 交会对接及样品转移试验

验证轨道器最后逼近靠拢段的高精度六自由度控制方案的正确性; 仿真验证轨道器满足抓捕条件、对接机构抓捕、上升器停控等整个交会对接过程的工作时序; 验证对接机构抓捕过程对轨道器和上升器的影响; 验证对接机构的抓捕能力; 验证对接机构分离过程对轨道器和上升器的影响; 检验在真实星上设备参加试验, 轨道器、对接机构、上升器真实运动情况下, 相关系统之间配合情况; 验证相对导航敏感器实际工作性能与系统相对导航方案的相容性; 验证月球轨道交会对接故障模式与对策. 交会对接及样品转移试验设施及试验现场见图18, 其大范围高精度气浮平台、相关的控制与测量精度总体居世界先进水平.

5.5 测控、应用与探测器天地对接试验

验证天地测控体制、应用接收体制的正确性. 验证轨道器X频段测控和数传设备, 上升器X频段测控设备和着陆器X频段数传设备, 返回器S频段测控数传设备与地面测控站(船)联合工作的匹配性、协调性和正确性. 验证在实际任务状态下, 地面测控设备对多目标(轨道器、上升器、着陆器和返回器)同时工作的兼容性和协调性. 验证轨道器、上升器和着陆器测控数传设备与北京中心、干涉测量系统、地面应用系统联合工作的匹配性和协调性.

图 17 嫦娥五号着陆起飞综合试验设施
Figure 17 Picture of CE-5's landing and take off test site.

图 18 嫦娥五号交会对接试验现场图

Figure 18 Picture of CE-5's docking test site.

5.6 大系统无线联试

检验天地大回路飞控方案与流程的正确性、有效性, 检验天地各系统协同工作的协调性、匹配性, 检验任务软件的正确性; 检验上行/下行信道工作的正确性, 检验飞行程序约束下遥控指令及注入数据的正确性, 检验部分故障预案对策的可行性; 在全过程1:1无线联试基础上工程全系统进行了合练, 验证全系统任务状态. 试验系统组成如图19所示.

5.7 返回器搜索回收综合演练

检验任务总体筹划及组织协调能力、夜间搜索处置回收训练成果, 检验参试装备性能, 检验各参试单位协同作战能力、各系统间接口协调性; 检验异常情况下各级指挥员应急指挥决策能力、返回器大范围偏差应急搜索处置能力, 检验预案文书的针对性、有效性, 检验联合搜索通信保障能力.

5.8 月球样品交接转运试验

样品返回后地面处理包括样品交接转运、密封封装装置解封、样品处理、样品存储和制备等. 通过试验验证样品交接转运操作流程的正确性, 验证接口匹配性, 完善交接转运过程的流程.

6 结束语

嫦娥五号工程创造性地设计了四器组合飞行、月面采样封装、月面起飞上升、无人环月对接、高速跳跃返回、国内回收的工程系统方案, 有力推动了大型低

图 19 嫦娥五号无线联试试验示意图

Figure 19 Schematic diagram of CE-5's wireless joint test.

温运载火箭和文昌新航天发射场的研制建设和任务执行能力的形成,形成了全球布局、全天时的中国深空测控网和再入测量走廊,新建了一系列高水平试验设施和月球样品实验室,形成了地面试验验证系统,构建了地

月往返航天工程体系,为后续载人登月、深空探测任务奠定了坚实基础,标志着中国航天技术能力向前迈出了一大步,产生了巨大的政治、经济、社会和军事效益,具有重大的战略意义和深远的历史影响。

参考文献

- Ye P J, Yang M F, Peng J, et al. Review and prospect of atmospheric entry and earth reentry technology of China deep space exploration (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 229–238 [叶培建, 杨孟飞, 彭兢, 等. 中国深空探测进入/再入返回技术的发展现状和展望. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 229–238]
- Pei Z Y, Wang Q, Tian Y S. Technology roadmap for Chang'e program (in Chinese). *J Deep Space Expl*, 2015, 2: 99–110 [裴照宇, 王琼, 田耀四. 嫦娥工程技术发展路线. 深空探测学报, 2015, 2: 99–110]
- Ye P J, Huang J C, Sun Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese Lunar Probe (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 543–558 [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. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 543–558]
- Peng J, Huang H, Xiang K H, et al. Conception design of a lunar robotic sampling and return mission (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2010, 19: 99–104 [彭兢, 黄昊, 向开恒, 等. 月球无人采样返回任务概念设想. 航天器工程, 2010, 19: 99–104]
- Zhang L, Yu D Y, Zhang H. Method and strategy of the Moon-to-Earth trajectory midcourse correction (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2012, 21: 18–22 [张磊, 于登云, 张焱. 月地转移轨道中途修正方法及策略. 航天器工程, 2012, 21: 18–22]
- Meng W J, Zeng T, Liu L, et al. Design and test verification of soft extraction bag used for deep lunar soil sampling and return (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2014, 31: 88–91 [孟伟杰, 曾婷, 刘丽, 等. 用于深层月壤采样返回的软质取心袋的设计与测试验证. 航天器环境工程, 2014, 31: 88–91]
- Lu B. Development analysis of foreign deep space exploration reentry and return technology (in Chinese). *Space Int*, 2014, 11: 11–17 [卢波. 国外深空探测再入返回技术发展分析. 国际太空, 2014, 11: 11–17]
- Wang Z S, Meng Z F, Gao S. Study of orbital maneuver strategies for precision lunar landing (in Chinese). *Spacecr Eng*, 2017, 26: 29–37 [汪中生, 孟占峰, 高珊. 月面定点着陆变轨策略研究. 航天器工程, 2017, 26: 29–37]
- Liu J Z, Hu C B, Pang F C, et al. Strategy of deep space exploration (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 229–238 [刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川. 深空探测发展战略研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 229–238]
- Zheng Y H, Deng X J, Zhao Z H, et al. The character and key technology suggestion of extraterrestrial sampling mission (in Chinese). *Expl Eng (Rock Soil Drill Tunnel)*, 2014, 41: 71–74 [郑燕红, 邓湘金, 赵志晖, 等. 地外天体采样任务特点及关键技术发展建议. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41: 71–74]
- Li G F, Liu Y, Ma C L, et al. Control strategy of lunar descent to achieve lunar landing (in Chinese). *J Beijing Univ Aeron Astron*, 2020, 46: 13–19

[李革非, 刘勇, 马传令, 等. 环月降轨实现月面着陆的控制策略. 北京航空航天大学学报, 2020, 46: 13–19]

- 12 Zhang L. Trajectory optimization and parameter analysis for lunar ascent (in Chinese). J Deep Space Expl, 2019, 6: 391–397 [张磊. 月面上升的轨迹优化与参数分析. 深空探测学报, 2019, 6: 391–397]

Overall design of unmanned lunar sampling and return project—Chang’e-5 mission

HU Hao¹, PEI ZhaoYu¹, LI ChunLai², PENG Jing³, LI Dong⁴, DONG GuangLiang⁵, LIU Ying⁵, REN JunJie¹, WANG Qiong¹, PANG FuChuan¹ & GAO Lei¹

¹ Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China;

² National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

⁴ China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

⁵ Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

The Chang’e-5 mission is the aerospace project with the highest complexity and largest technical span in China. In this paper, the mission objectives and main technical specifications of the mission are introduced, and the project technical scheme is described in terms of the system composition, design constraints, and flight profile. The focus is on seven aspects of technological innovation, such as a novel scheme of return of samples of extraterrestrial objects and two sampling modes—surface sampling and drilling. Eight large-scale tests involving mission matching, coordination, and correctness were analyzed. The tests included the re-entry flight test and a comprehensive test of lunar surface landing and taking-off. The results can provide an important reference for other extraterrestrial sample return missions.

Chang’e-5, lunar surface sampling, taking off from the lunar surface, rendezvous and docking (RVD), skip re-entry

doi: [10.1360/SST-2021-0155](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0155)