嫦娥四号工程的技术突破与科学进展

吴伟仁¹, 于登云^{2*}, 王赤³, 刘继忠¹, 唐玉华¹, 张熹⁴, 张哲¹

1. 探月与航天工程中心, 北京 100190

2. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048

3. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

4. 中国空间技术研究院, 北京 100081

* 通信作者. E-mail: yudyun@sina.com

收稿日期: 2020-04-23; 接受日期: 2020-06-10; 网络出版日期: 2020-12-03

国家中长期科技发展规划重大专项 (探月工程) 资助项目

摘要 嫦娥四号工程首次实现人类探测器在月球背面着陆和巡视探测, 在国际月球探测史上树立了新的里程碑. 本文简要介绍了国际月球探测态势, 回顾了嫦娥四号工程的实施历程, 对工程在地-月中继通信、月球背面高精度着陆、空间同位素电源研制等方面所实现的重要技术突破进行了阐述, 并总结了在月球背面形貌、矿物组分和环境探测等方面已取得的多项原创性科学研究成果. 本文可为后续深化月球和行星领域探测与科学研究提供借鉴.

关键词 嫦娥四号, 技术突破, 科学进展, 设计与分析, 任务实现

1 引言

月球作为距离地球最近的天体, 是人类深空探测的首选目标, 人类已先后实施了约 118 次探测活动, 除 20 多个探测器实施了月球正面着陆探测以外, 其他都是对月球的环绕和飞越探测^[1]. 月球背面是人类在地球上始终无法观测的未知世界, 具有最大、最深、最古老的撞击坑, 加之始终背对地球, 屏蔽了来自地球的电磁干扰, 是开展射电天文观测的理想场所, 不仅有助于研究解决宇宙的暗黑时代以及黎明时期等重大科学问题, 而且对研究月球和太阳系早期历史和演化也具有重要意义^[2~5]. 美国、欧洲都曾设想着陆月球背面, 但由于月球背面无法直接对地通信, 且地形崎岖复杂, 技术挑战极大, 因此至今尚未涉足该区域.

近年来, 欧洲航天局提出了月球南极探测规划, 在月球南极建立“月球村”; 俄罗斯制定了月球南极探测计划, 拟通过月球-25 至月球-28 共 4 次任务的实施, 在南极建立“月球基地”; 印度在 2019 年实施月船 2 号南极着陆失败后, 又计划在 2021 年前后发射月船 3 号任务, 再次进行南极着陆探测;

引用格式: 吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 嫦娥四号工程的技术突破与科学进展. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1783–1797, doi: 10.1360/SSI-2020-0103
Wu W R, Yu D Y, Wang C, et al. Technological breakthrough and scientific achievement of Chang'e-4 project (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 1783–1797, doi: 10.1360/SSI-2020-0103

图 1 (网络版彩图) 嫦娥四号工程组成

Figure 1 (Color online) The composition of Chang'e-4 project

美国 2015 年提出月球背面探测设想, 2017 年提出“重返月球”, 2019 年正式发布“阿尔忒弥斯”计划 (Artemis program), 将在 2024 年实施月球南极登陆, 以主导国际探测的新格局 [6~8]。由此可见, 月球南极探测已成为航天大国竞相抢占的战略制高点。

我国 2014 年提出实施嫦娥四号工程, 率先开展月球背面着陆探测, 并于 2018 和 2019 年分别首次实现人类地 - 月拉格朗日 2 点中继通信和探测器在月球背面南极 - 艾特肯盆地 (south Pole-Aitken basin) 冯·卡门 (Von Kármán) 撞击坑软着陆, 开展科学探测和实验, 树立了人类探月史上又一新的里程碑。迄今, 已突破了一批关键技术, 并取得了多项重要阶段性科学成果。

2 工程主要研制历程

嫦娥四号工程由工程总体和探测器、运载火箭、发射场、测控、地面应用等 5 大系统组成 (如图 1 所示)。任务共配置了 13 台 (套) 科学探测仪器 (如图 2 所示), 其中包括荷兰、沙特、瑞典、德国等 4 台套国际合作载荷, 并研制搭载了首个环月天文观测“龙江号”微卫星。嫦娥四号工程包括中继星和探测器两次发射任务 [9, 10]。

2014 年 7 月启动实施方案论证工作。经过深化论证和多方案反复比较, 2015 年 5 月确定了研制一颗工作在地 - 月 L2 点的中继星, 研制适应月球背面着陆和巡视的由着陆器和巡视器 (后命名为“玉

图 2 (网络版彩图) 嫦娥四号科学探测仪器

Figure 2 (Color online) The instrument for scientific research of Chang'e-4 project

兔二号”月球车)组成的探测器,实现在月球背面着陆,开展就位和巡视探测的实施方案.2016年1月正式立项实施.

2018年5月21日,“鹊桥”中继星由长征四号丙(CZ-4C)运载火箭送入地月转移轨道.经过多次轨道机动与捕获,24天后成功进入距月球约7万公里、距地球约45万公里的L2点使命轨道并稳定运行^[11].中继星飞行轨道如图3所示.

2018年12月8日,探测器由长征三号乙(CZ-3B)运载火箭送入远地点42万公里的地月转移轨道.经过中途修正、近月制动和环月降轨,在距月面15 km高度开始动力下降,经历近700 s的主减速、快速调整、接近、悬停、避障和缓速下降等过程后,探测器于2019年1月3日10时26分安全着陆在月球背面冯·卡门撞击坑预选着陆区,先后完成两器分离、互相拍照,并在中继星的支持下,开始长期科学探测与实验^[10,12].探测器飞行轨道如图4所示.

3 工程主要技术突破

嫦娥四号工程创新性强、技术难度大、任务复杂度高、国际影响大,自实施以来,实现了多项技术突破,主要表现在如下6个方面.

3.1 国际首次实现了月球背面与地球间的连续可靠中继通信

提出了基于地-月L2点轨道的再生转发深空中继通信方案,其中继通信链路如图5所示.突破了远距离微弱信号的快速扫描捕获和逼近理论门限解调等关键技术,实现了低信噪比宽带信号的可靠中继,使中继通信能力由4万公里跃升到45万公里^[13].

发明了一种地-月L2点Halo使命轨道构型设计(地-月Halo轨道构型如图6所示)和“三脉冲”轨道捕获控制方法,突破了多约束耦合条件下的轨道设计和控制等关键技术,解决了中继星对月球背面探测器全时段稳定中继通信的难题^[14].

研制了首个用于深空的轻小型、长寿命中继星和耐低温的轻质、高增益、大口径中继天线(如图7

图 3 (网络版彩图) 中继星飞行轨道
Figure 3 (Color online) The flight orbit of relay satellite

所示), 突破了网状天线材料和型面保持技术, 天线耐低温能力由 2 小时提升至 6 小时, 温度由 -180°C 扩展至 -235°C , 实现极低温环境下的安全运行和精确指向^[15]. 中继星网状天线热变形数值分析如图 8 所示.

3.2 国际首次实现了月球背面复杂崎岖地形自主避障和高精度着陆

针对月球背面地形崎岖、可选着陆区范围仅为嫦娥三号的 5% 的严酷条件, 发明了基于近月制动和环月修正双层迭代的轨道联合控制方法, 具备了在多个发射窗口条件下均在同一狭小区域“定时定点”着陆的能力^[16, 17].

针对航迹起伏高达 7 公里的安全着陆难题, 提出了一种接近垂直降落的动力下降控制方法, 突破了自主粗避障和精避障异构融合、故障快速自主诊断和系统重构等关键技术^[18~20], 实现了着陆点自主选择 and 精确避障, 避障范围高达 300 m. 探测器动力下降过程如图 9 所示, 着陆区三维高程分布如图 10 所示.

3.3 首次实现了我国空间同位素电源的国产化

突破了剧毒的钚-238 放射性空间同位素电源 (如图 11 所示) 制备、4 大类 19 项空间应用安全性综合实验及评价技术, 实现了同位素电源国产化; 攻克了放射性同位素电源设计、热电转换材料研制、高效热传递等关键技术, 研制了适应边界温差高达 210°C 、可稳定发电的同位素电源^[21], 构建了我国空间核能源的研制体系和技术规范, 解决了未来深空探测任务能源供给的核心关键难题.

提出了月夜基于同位素电源供电的月壤温度自动测量方法, 国际首次获得月球背面浅层月壤昼夜温度, 实测到最低温为 -196°C (月表昼夜温度测量曲线如图 12 所示), 改变了人类以往对月球环境的认知.

图 4 (网络版彩图) 探测器飞行轨道
Figure 4 (Color online) The orbit of lunar probe

3.4 首次突破了火箭多窗口可靠发射和组合导航滤波优化技术

针对中继星高精度入轨要求, 提出了多窗口优化发射轨道设计方法, 突破了多干扰综合环境下的高精度制导技术, 使 CZ-4C 火箭入轨精度实现了数量级的提高^[11, 22], 其火箭飞行高度比如图 13 所示; 攻克了常温推进剂高精度温控技术, 实现了连续 3 天 5 个窗口可随时发射和对发射任务的适应能力.

突破了组合导航滤波优化技术, 使 CZ-3B 火箭在远地点高度达 42 万公里的情况下, 入轨精度从千公里级提高至百公里级. 突破了氢氧推进剂加注后推迟发射的处置保障技术, 首次具备了推迟 24 h 发射的工程能力^[23].

3.5 实现了月球探测六目标测控和 Halo 轨道中继星的高精度长期控制

提出了全球布站的多目标深空测控方案, 突破了多信道并行与多任务协同处理技术, 首次实现了任务期间对中继星、着陆器、微卫星等多达 6 个深空目标的可靠测控, 具备探月任务的多目标近全天时可靠测控能力^[24, 25]. 嫦娥四号任务多目标测控示意图如图 14 所示.

提出差分单向测距、再生伪码测距等多种手段联合的高精度测定轨方法, 攻克了动量轮卸载与轨道维持联合规划、逐次收敛的 Halo 轨道最优维持技术^[26~28], 实现了地-月 L2 点动力学弱约束条件下的高精度轨道测定、预报和长期运行控制, 节省的推进剂可使中继星寿命由 3 年提升至 10 年.

图 5 (网络版彩图) 中继通信链路图

Figure 5 (Color online) The diagram of relay communication link

图 6 (网络版彩图) 地 - 月 Halo 轨道构型图

Figure 6 (Color online) The diagram of Earth-Moon Halo orbit

3.6 突破了国际首颗环月微卫星系统技术

“龙江号”微卫星 (如图 15 所示) 搭载中继星发射, 成为全球首个独立完成地月转移、近月制动和环月飞行的微卫星, 开展了月球轨道超长波天文观测和 VLBI 高精度测定轨实验, 验证了深空探测微纳卫星平台技术, 推动了微纳卫星在深空探测领域的发展与应用. 同时, 微卫星上还搭载了沙特研制的光学相机, 开展了对月成像观测.

图 7 (网络版彩图) “鹊桥号” 中继星

Figure 7 (Color online) The relay communication satellite “Queqiao”

图 8 (网络版彩图) 中继星网状天线热变形分析图

Figure 8 (Color online) Thermal deformation analysis of mesh antenna for relay satellite

图 9 (网络版彩图) 动力下降过程示意图

Figure 9 (Color online) The diagram of powered descent phase

4 主要阶段性科学成果

嫦娥四号工程共装载了 13 台(套)科学探测与实验仪器,其中,在着陆器和玉兔二号月球车上,共搭载了 8 台科学载荷和 1 台生物科普实验载荷.到目前为止,着陆器和玉兔二号月球车已在月面稳定探测 17 个月昼,创造了世界月球车最长巡视工作记录,获取了大量探测数据,为开展月球科学研究提

图 10 (网络版彩图) 着陆区三维高程图

Figure 10 (Color online) Three-dimensional elevation map of landing area

图 11 (网络版彩图) 空间同位素电源

Figure 11 (Color online) Space radioisotope thermoelectric generators (RTG)

图 12 (网络版彩图) 月表昼夜温度测量曲线

Figure 12 (Color online) Day and night temperature measurement curve of the lunar surface

图 13 (网络版彩图) CZ-4C 火箭飞行高度比对

Figure 13 (Color online) Flight altitude comparison of CZ-4C rocket

供了宝贵的第一手资料. 在国际上首次实现月球背面形貌、矿物组分和环境探测, 获得多项原创性科学成果.

4.1 揭示了月球背面地下 40 m 深度内的地质分层结构

利用玉兔二号月球车上搭载的测月雷达, 通过开展巡视路线上 (巡视探测路线如图 16 所示) 月球次表层结构探测, 研究了巡视区月壤厚度与月亮浅层结构, 首次揭示了月球背面着陆区域地下 40 m 深度内的地质分层结构. 根据获得的物性参数和雷达图像, 沿着月球车行走的 106 m 路径, 在深度 40 m 的范围内, 获得了月表下物质的特性参数, 以及溅射物内部地层序列, 识别出了 3 个不同物理特性的次表层地层单元, 发现地下物质由低损耗的月壤物质和大小不同的大量石块组成. 研究结果极大地提高了人类对月球撞击和火山活动历史的理解, 并为月球背面的地质演化研究带来新的启示^[29]. 月球次表层结构剖面如图 17 所示.

图 14 (网络版彩图) 多目标测控示意图

Figure 14 (Color online) The diagram of multi-target TT&C

图 15 (网络版彩图) “龙江号”微卫星示意图

Figure 15 (Color online) The diagram of “Longjiang” microsatellite

图 16 (网络版彩图) 玉兔二号月球车巡视路线

Figure 16 (Color online) The traverse paths of Yutu-2

4.2 初步揭示了月球的深部物质组成

利用玉兔二号月球车携带的可见光和近红外光谱仪的探测数据, 嫦娥四号着陆区月壤光谱的吸收特征与月球正面月海玄武岩质月壤光谱的吸收特征存在着显著差异, 展现出低钙辉石的光谱特征, 并暗示有大量橄榄石的存在. 进一步的分析证实, 嫦娥四号着陆区月壤物质中橄榄石相对含量最高, 低钙辉石次之, 仅含有很少量的高钙辉石. 这种矿物组合很可能代表了源于月幔的深部物质^[30].

图 17 (网络版彩图) 月球次表层结构剖面示意图^[29]

Figure 17 (Color online) Schematic representation of the subsurface geological structure^[29] @Copyright 2020 AAAS

玉兔二号月球车不仅获取了很多的月壤光谱数据, 还测量了一个石块, 其受到风化程度较小, 保留了岩石本身的光谱特征. 玉兔二号月球车巡视区月壤和石块具有相似的光谱特征, 表明石块与月壤母岩可能是同源的, 而且它们的光谱特征与 Finsen 陨石坑物质更接近 (如图 18 所示). 进一步印证了嫦娥四号着陆区物质主要来源于 Finsen 撞击坑, 代表了南极 – 艾特肯盆地的深部物质. 基于辐射传输模型得出石块为含橄榄石苏长岩, 与月幔成分不一致; 而且石块具有中等 – 细粒的岩石结构, 表明可能是快速结晶形成的, 不大可能是下月壳的原始深成岩. 这可能是由于南极 – 艾特肯盆地在形成过程中, 巨大的撞击能量使得下月壳和上月幔物质混合熔融, 形成一个岩浆湖, 而观测到的石块是从这个岩浆湖中分异结晶形成的^[31].

4.3 获得了月球背面空间环境数据

嫦娥四号着陆器搭载了中德合作的月球中子及辐射剂量探测仪 (LND) 用来探测月表粒子辐射及其剂量. 玉兔二号月球车搭载了中瑞合作的中性原子探测仪 (ASAN) 则用来观测巡视探测点的能量中性原子 (energetic neutral atom). ASAN 探测数据表明, 能量大于 30 eV 的能量中性原子, 其能谱结构及反照率与印度的 Chandrayaan-1 卫星和美国的 IBEX 卫星观测结果一致性较好, 主要为太阳风质子直接反向散射的氢原子; 而能量小于 30 eV 的能量中性原子通量和反照率则明显高于以上卫星观测结果, 这可能是因为嫦娥四号着陆区特殊的月壤特性 (微孔多少、颗粒大小, 以及成分等) 导致产生了较多能量较低的溅射能量中性原子^[32]. LND 在国际上首次在月表获得了粒子辐射环境数据, 包括辐射剂量率、线性能量转移谱 (LET 谱)、带电粒子和中子能谱. 通过 LND 的数据得到在月表的辐射剂量率为 $13.21 \pm 1.01 \mu\text{Gy/h}$ (微格瑞/小时), 中性粒子的剂量率为 $3.05 \pm 0.43 \mu\text{Gy/h}$ (微格瑞/小时), 平均品质因子为 4.32 ± 0.65 , 银河宇宙线的剂量当量为 $57.06 \pm 10.57 \mu\text{Sv/h}$ (微西弗/小时). 这对于月球背面空间环境特征和变化规律的了解有重要的科学价值, 并对未来载人登月的空间环境保障提供了实测环境数据的支持.

4.4 首次获得了空间低频射电频谱信号数据

研制了低频射电频谱仪, 突破了空间低频射电信号探测技术, 首次在月球背面进行了超宽带甚低频 (10 kHz~40 MHz) 射电天文信号观测, 获得了高分辨率低频射电三分量时变波形数据^[5, 33, 34], 对于

图 18 (网络版彩图) 月球石块物质组成^[31]

Figure 18 (Color online) Material component of the lunar rocks. (a) VNIS spectra of the rock and lunar regolith measured by Chang'e-4. Four other spectra (in grey color) of the basaltic lunar regolith measured by Chang'e-3 are shown for comparison. (b) and (c) are the CMOS images of the rock (labeled as 303) and the lunar soil (labeled as 207) at $0.75\ \mu\text{m}$ observed by VNIS imaging spectrometer, respectively. The yellow circle is SWIR field, and the scale bar is 20 mm^[31]
©Copyright 2019 Oxford University Press

研究太阳低频射电特征和月表低频辐射环境具有重要的科学意义.

4.5 开展了系列科学实验

研制生物科普实验载荷, 攻克了复杂环境下的生物固定、自主温控、月面条件下的导光等关键技术, 将动物、植物和微生物构成的生物组合搭载在着陆器上, 实现了人类首次在月球表面生物培育实验, 观测到了棉花种子在月面密闭环境下的生长发育过程^[10].

成功研制满足中继星激光测距要求的角反射器, 突破了地基激光测距望远镜高精度指向与跟踪等关键技术, 在国际上首次开展超地月距离的反射式激光测距, 将显著提高深空卫星激光测距的精度^[35~37]. 利用改造后的中国科学院云南天文台 1.2 m 望远镜和中山大学新建的珠海 1.2 m 望远镜, 国内首次实现了对 20 世纪美国发射的阿波罗 - 11、阿波罗 - 14、阿波罗 - 15 和苏联发射的月球 - 17、月球 - 21 任务安置的激光反射器的激光测距实验.

5 结束语

嫦娥四号工程自 2018 年成功实施以来, 已取得多项技术突破和重要的阶段性科学成果, 获得授权发明专利 150 余项; 在《中国科学》系列、*Nature*、*Science* 等国内外主要刊物和会议上发表论文 140

余篇; 出版专著 4 部. 这些成果不仅促进了我国空间射电天文学、行星科学等发展, 实现了全月面到达、自主精准着陆、地-月 L2 点中继、高精度高可靠发射、多目标月球测控通信、空间同位素电源国产化等能力, 而且带动了新能源、新材料、新工艺、人工智能、先进电子等技术的进步, 对推动航天强国和科技强国建设、提高民族凝聚力, 具有重大现实意义和深远历史影响.

在探月工程中, 嫦娥四号首次面向全国大、中学生开展了科普载荷搭载实验, 极大地激发了青少年的探索热情. 还首次搭载了德国、沙特等多个国家的科学载荷, 建立了科学数据的国际合作共享机制.

嫦娥四号着陆点被国际天文联合会命名为“天河基地”, 成为继阿波罗 11 号着陆点被命名为“静海基地”之后的第 2 个“基地”. 嫦娥四号研制团队被英国皇家航空学会授予 2019 年度唯一金奖, 这是该学会成立 153 年来首次为中国项目授奖; 嫦娥四号任务被国际月球村协会授予 2019 年度优秀任务奖, 被美国航天基金会评为 2020 年度唯一的太空探索奖. 这些成果的取得显著提升了我国的国际影响力.

参考文献

- 1 Wu W R, Liu J Z, Tang Y H, et al. China lunar exploration program. *J Deep Space Explor*, 2019, 6: 405–416 [吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程. 深空探测学报, 2019, 6: 405–416]
- 2 Ouyang Z Y. *Introduction to Lunar Science*. Beijing: Beijing Astronautic Publishing House, 2005 [欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005]
- 3 Sun Z Z. *Technology of Deep Space Exploration*. Beijing: Beijing Institute of Technology Publishing House, 2018 [孙泽州. 深空探测技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2018]
- 4 Li F, Wu B, Yang M, et al. Topographic and occlusion analysis of the Chang'e-4 landing site in the Von Kármán crater. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 1385–1396 [李飞, 吴波, 杨眉, 等. 嫦娥四号冯·卡门撞击坑着陆区地形及月面遮挡分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1385–1396]
- 5 Ji Y C, Zhao B, Fang G Y, et al. Key technologies of very low frequency radio observations on the lunar far side. *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 150–157 [纪奕才, 赵博, 方广有, 等. 在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究. 深空探测学报, 2017, 4: 150–157]
- 6 Fan W W, Yang F, Han L, et al. Overview of Russia's future plan of lunar exploration. *Sci Technol Rev*, 2019, 37: 6–11 [范唯唯, 杨帆, 韩淋, 等. 俄罗斯未来月球探索与开发计划解析. 科技导报, 2019, 37: 6–11]
- 7 Li Y, He H D. An analysis of manned return to the moon in the United States before 2024. *Space Int*, 2019, 8: 18–25 [李意, 何慧东. 美国 2024 年前载人重返月球情况分析. 国际太空, 2019, 8: 18–25]
- 8 Lu B. Review and prospect of world lunar exploration. *Space Int*, 2019, 1: 12–18 [卢波. 世界月球探测的发展回顾与展望. 国际太空, 2019, 1: 12–18]
- 9 Wu W R, Liu J Z, Tang Y H. *The Chang'e-4 Mission*. Beijing: China Astronaut Publ House, 2019 [吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华. 嫦娥四号工程. 北京: 中国宇航出版社, 2019]
- 10 Ye P J, Sun Z Z, Zhang H, et al. Mission design of Chang'e-4 probe system. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 124–137 [叶培建, 孙泽洲, 张焱, 等. 嫦娥四号探测器系统任务设计. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 124–137]
- 11 Zhang L H, Xiong L, Sun J, et al. Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Chang'e-4 lunar farside exploration mission. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 138–146 [张立华, 熊亮, 孙骥, 等. 嫦娥四号任务中继星“鹊桥”技术特点. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 138–146]
- 12 Zhang H, Wu X Y, Li F. Overview of Chang'e-4 probe mission. *Aerospace China*, 2019, 4: 16–23 [张焱, 吴学英, 李飞. “嫦娥”四号探测器任务概貌. 中国航天, 2019, 4: 16–23]

- 13 Sun Z Z, Wu X Y, Liu S, et al. Design and verification of relay communication system for lunar farside exploration. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 147–155 [孙泽洲, 吴学英, 刘适, 等. 地月中继链路系统设计与验证. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49: 147–155]
- 14 Yu D Y, Zhou W Y, Gao S. Orbit dynamic modeling and control strategy for earth-moon system libration point. *Spacecr Eng*, 2019, 28: 9–18 [于登云, 周文艳, 高珊. 地月系平动点轨道动力学建模与控制策略研究. *航天器工程*, 2019, 28: 9–18]
- 15 Chen G H, Wang B, Hua Y, et al. The key technologies for radial rib deployable antenna of Chang'e-4 relay satellite. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 166–174 [陈国辉, 王波, 华岳, 等. 嫦娥四号中继星伞状可展开天线关键技术研究. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49: 166–174]
- 16 Sun Z Z, Zhang H, Wu X Y, et al. Flight results of Chang'e-4 lander summary and evaluation. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 1397–1407 [孙泽洲, 张焱, 吴学英, 等. 嫦娥四号着陆器在轨实践总结与评估. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49: 1397–1407]
- 17 Wang J, Wu W R, Li J, et al. Vision based Chang'e-4 landing point localization. *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 41–53 [王稼, 吴伟仁, 李剑, 等. 基于视觉的嫦娥四号探测器着陆点定位. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 41–53]
- 18 Liu D C, Zhou W Y, Gao S, et al. Design and implementation of lunar landing orbital maneuver strategy at fixed-time and fixed-site for Chang'e-4 lander. *Spacecr Eng*, 2019, 28: 16–21 [刘德成, 周文艳, 高珊, 等. 嫦娥四号着陆器月面定时定点着陆轨道控制策略设计与实施. *航天器工程*, 2019, 28: 16–21]
- 19 Yu D Y. *Technology of Lunar Soft Lander*. Beijing: National Defense Industry Press, 2016 [于登云. 月球软着陆探测器技术. 北京: 国防工业出版社, 2016]
- 20 Zhang H H, Guan Y F, Cheng M, et al. Guidance navigation and control for Chang'e-4 lander. *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 1418–1428 [张洪华, 关轶峰, 程铭, 等. 嫦娥四号着陆器制导导航与控制系统. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49: 1418–1428]
- 21 Song X, Chen X D, Lei Y J, et al. Design and verification of heat and electricity cogeneration system in moon night of Chang'e-4 lander. *Spacecr Eng*, 2019, 28: 64–69 [宋馨, 陈向东, 雷英俊, 等. 嫦娥四号着陆器月夜热电联供系统设计与验证. *航天器工程*, 2019, 28: 64–69]
- 22 Liu X Z. Chang'e-4 relay satellite has been launched successfully. *Missiles Space Veh*, 2018, 3: 14 [刘晓正. 嫦娥四号中继星成功发射. *导弹与航天运载技术*, 2018, 3: 14]
- 23 Wei J H. Chang'e-4 probe was launched successfully by Changzheng 3B carrier rocket. *Aerospace China*, 2018, 12: 30–31 [魏京华. “长征”三号 B 运载火箭成功发射“嫦娥”四号探测器. *中国航天*, 2018, 12: 30–31]
- 24 Dong G L, Geng H J, Li G M, et al. *China Deep Space Network: System Design and Key Technologies*. Beijing: Tsinghua University Press, 2016 [董光亮, 耿虎军, 李国民, 等. 中国深空网: 系统设计与关键技术. 北京: 清华大学出版社, 2016]
- 25 Liu S, Huang X F, Mao Z Y, et al. Design and verification of telecommunication system for Chang'e-4 lander. *Spacecr Eng*, 2019, 28: 85–93 [刘适, 黄晓峰, 毛志毅, 等. 嫦娥四号着陆器测控通信系统设计与验证. *航天器工程*, 2019, 28: 85–93]
- 26 Chen L, Xie J F, Han S T, et al. Open loop velocity measurement scheme design and verification of Chang'e-4 relay satellite. *J Deep Space Explor*, 2019, 6: 236–240 [陈略, 谢剑锋, 韩松涛, 等. “嫦娥 4 号”中继星开环测速方案设计与试验验证. *深空探测学报*, 2019, 6: 236–240]
- 27 Duan J F, Chen M, Zhang Y, et al. Orbit determination and analysis of Chang'e-4 relay satellite on mission orbit. *J Deep Space Explor*, 2019, 6: 247–253 [段建锋, 陈明, 张宇, 等. “嫦娥 4 号”中继星使命轨道段定轨计算与分析. *深空探测学报*, 2019, 6: 247–253]

- 28 Wu W R, Dong G L, Li H T. Engineering and Technology of Deep Space TT&C System. Beijing: Science Press, 2013 [吴伟仁, 董光亮, 李海涛. 深空测控通信系统工程与技术. 北京: 科学出版社, 2013]
- 29 Li C L, Su Y, Pettinelli E, et al. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'e-4 lunar penetrating radar. *Sci Adv*, 2020, 6: 6898
- 30 Li C L, Liu D W, Liu B, et al. Chang'e-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature*, 2019, 569: 378–382
- 31 Lin H L, He Z P, Yang W, et al. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA-impact melt pool. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 913–920
- 32 Zhang A, Wieser M, Wang C, et al. Emission of energetic neutral atoms measured on the lunar surface by Chang'e-4. *Planet Space Sci*, 2020, 189: 104970
- 33 Jia Y Z, Xue C B, Zou Y L. The far side of moon — the holy land of low-frequency radio astronomy. *Modern Phy*, 2019, 4: 101–108 [贾瑛卓, 薛长斌, 邹永廖. 月球背面 —— 低频射电天文观测的圣地. 现代物理知识, 2019, 4: 101–108]
- 34 Xu H T, Xue C B, Liu P, et al. Payload task design and verification of Chang'e-4 lander. *Spacecr Eng*, 2019, 28: 101–108 [徐海涛, 薛长斌, 刘鹏, 等. 嫦娥四号着陆器有效载荷任务设计与验证. 航天器工程, 2019, 28: 101–108]
- 35 Li C X, Gao Q P, Li Y Q. Estimation of the success probability for relay satellite laser ranging around E-M L2. *Astron Res Technol*, 2019, 16: 44–53 [李春晓, 高清鹏, 李语强. 地月系 L2 点中继星激光测距成功率的估算. 天文研究与技术, 2019, 16: 44–53]
- 36 He Y, Liu Q, Tian W, et al. Study on laser ranging for satellite on the second lagrange point of Earth-Moon system. *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 130–137 [何芸, 刘祺, 田伟, 等. 地月第二拉格朗日点卫星激光测距技术研究. 深空探测学报, 2017, 4: 130–137]
- 37 Gao Q P, Li C X, Li R W, et al. Magpie bridge satellite laser ranging time window and distance probability analysis. *Astron Res Technol*, 2019, 16: 422–430 [高清鹏, 李春晓, 李荣旺, 等. 鹊桥卫星激光测距时间窗口及测距成功概率分析. 天文研究与技术, 2019, 16: 422–430]

Technological breakthrough and scientific achievement of Chang'e-4 project

Weiren WU¹, Dengyun YU^{2*}, Chi WANG³, Jizhong LIU¹, Yuhua TANG¹,
He ZHANG⁴ & Zhe ZHANG¹

1. *Lunar Exploration and Space Engineer Center, Beijing 100190, China;*

2. *China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;*

3. *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

4. *China Academy of Space Technology, Beijing 100081, China*

* Corresponding author. E-mail: yudyun@sina.com

Abstract Chang'e-4 is the first man-made probe that accomplished landing and roving on the far side of the moon, setting a new mile-stone in lunar exploration. This paper gives a brief introduction to the state of international lunar exploration and reviews the implementation process of the Chang'e-4 project. After sorting the important technological breakthroughs in the aspects such as Earth-Moon relay communications, high-precision landing on the far side of the moon and radioisotope thermoelectric generators (RTG), this paper summarizes a number of original scientific research achievements in the topography of the far side of the moon, mineral composition and environmental detection. It could provide references for further lunar exploration, planetary exploration and scientific research.

Keywords Chang'e-4, technological breakthrough, scientific achievement, design and analysis, mission implementation

Weiren WU was born in 1953. He is a member of Chinese Academy of Engineering and International Academy of Astronautics, and the chief designer of the Chinese Lunar Exploration Project. His research interests include telemetry track and command (TT&C) and deep space exploration engineering system design.

Dengyun YU was born in 1961. He is a senior researcher at China Aerospace Science and Technology Corporation and the deputy chief designer of the Chang'e-4 Lunar exploration project. His research interests include spacecraft system engineering, dynamics, and control simulation.

Chi WANG was born in 1967. He is a member of Chinese Academy of Sciences and a senior researcher at National Space Science Center. His research interests include data analysis and numerical simulation of heliospheric solar wind structures, propagation and evolution of interplanetary disturbances, and interaction of solar wind with the Earth's magnetosphere.