

“嫦娥3号”月球软着陆工程中的关键技术

吴伟仁¹, 于登云²

(1. 探月与航天工程中心, 北京 100037; 2. 中国航天科技集团公司, 北京 100048)

摘要: 2013年12月14日, “嫦娥3号”月球探测器成功降落在月球北纬44.12°、西经19.51°的虹湾着陆区, 巡视器与着陆器成功分离、转移并完成互拍, 首次实现了中国航天器在地外天体软着陆与巡视勘察, 使中国成为继美国和前苏联之后第三个成功实现月球软着陆的国家。在简述“嫦娥3号”月球软着陆工程研制历程的基础上, 分析总结了工程研制中突破的主要关键技术。

关键词: 嫦娥3号; 月球软着陆; 关键技术

中图分类号: V41 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2014)02-0105-05

Key Technologies in the Chang'e-3 Soft-Landing Project

WU Weiren¹, YU Dengyun²

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

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: On Dec. 14, 2013, Chang'e-3 lunar probe successfully landed on the Rainbow Bay area at 44.12° N / 19.51° W of the moon, then the lunar lander and rover successfully separated and took photos of each other, which achieved the mission objective of our nation's first soft landing and roving exploration on a celestial body beyond the Earth, and made China the third country achieving lunar soft landing after the United States and the former Soviet Union. In this paper, based on the brief introduction of the development process of Chang'e-3 project, the key technologies of the project are summarized.

Key words: Chang'e-3 project; soft lunar landing; key technology

0 引言

“嫦娥3号”月球软着陆工程作为我国探月工程“绕、落、回”三步走规划的第二步, 其主要任务目标是突破月球软着陆、月面巡视、月夜生存、多目标深空测控通信和地月转移轨道多窗口高精度发射等关键技术, 实现月面软着陆; 进行月面就位探测与巡视探测, 并开展月面形貌与地质构造探测、月表物质成分和可利用资源调查, 以及地球等离子体层探测与月基光学天文观测研究^[1-2]。

“嫦娥3号”月球软着陆工程由探测器、运载火箭、发射场、测控和地面应用等五大系统组成^[3]。其中, 探测器系统由着陆器和月面巡视器(“玉兔号”月

球车)组成。自2008年立项以来, 先后经历了方案设计、初样研制和正样研制三个阶段, 完成了设计分析仿真、产品制造、试验验证、独立评估、质量复查和出厂评审等研制建设工作, 研制了新技术新产品占80%以上的着陆器和巡视器, 首次研制建设了模拟低重力悬停、避障、着陆等大型试验设施; 运载火箭系统采用双激光惯组和多窗口发射技术, 测控系统新研制了66 m、35 m大口径天线的S/X频段深空站^[4], 发射场系统首次实现了同位素核源状态下的成功发射^[5], 地面应用系统建立了我国首个遥科学实验室。

2013年12月2日, “嫦娥3号”探测器在西昌卫星发射中心由“长征3号乙”运载火箭成功送入近月点200 km、远月点38万 km的地月转移轨道;

12月6日,“嫦娥3号”探测器飞抵月球,并成功实施近月制动顺利进入约100 km环月轨道;12月10日,在环月轨道成功实施变轨控制,进入预定的近月点15 km月面着陆椭圆轨道;12月14日,从近月点15 km开始着陆下降,在月球正面北纬44.12°、西经19.51°的预选虹湾着陆区成功实现软着陆;12月15日,巡视器与着陆器成功分离,驶抵月面,并与着陆器实现两器互拍;随后,两器所有载荷正常工作,独立开展了相应的多种科学探测任务。这标志着“嫦娥3号”月球软着陆工程作为探月工程二期的标志性任务取得圆满成功。

“嫦娥3号”任务的创新性主要体现在我国首次实现地外天体软着陆、月表无人自动巡视、探测器月夜生存、月面就位与巡视科学探测等,首次研制建设了可满足火星等深空探测的测控通信网。这不仅涉及一系列需要突破的关键技术,而且具有技术新、平台新、产品新和环境新以及关键技术攻关难和地面试验验证难等特点。这一系列关键技术的突破确保了嫦娥任务的圆满成功。本文将对一些主要关键技术作简要分析。

1 主要关键技术

1.1 探测器总体技术

“嫦娥3号”探测器作为我国第一个地外天体软着陆探测器,也是继前苏联1976年“月球24”着陆月球后重返月球的第一个软着陆探测器。它由着陆器和巡视器组成,着陆器携带巡视器着陆月面,与巡视器进行两器分离后开展就位探测;巡视器驶抵月面后,开展月面巡视探测。如何在着陆区位置与复杂环境、火箭的承载能力与入轨精度、测控通信弧段与精度等约束条件下,合理设计探测器运行轨道、指标分配、构型布局、能源需求、信道余量、数据传输和月面试验验证项目与方法,以及与各系统接口关系等,以实现“嫦娥3号”任务工程和科学目标,都是探测器总体必须考虑和突破的关键技术^[3]。

“嫦娥3号”探测器作为工程五大系统中新技术最多、技术难度最大的系统,在工程研制总要求约束下,通过方案论证、系统仿真等工作,突破了任务分析、轨道设计、环境影响分析、发动机羽流影响分析等探测器总体关键技术,合理地确定了总体技术方案,为“嫦娥3号”任务顺利实施奠定了良好基础。

1.2 探测器着陆悬停避障技术

“嫦娥3号”任务首选虹湾地区作为探测器着陆

区。虽然它具有地势较平坦、科学意义大、测控通信好及从未探测过等特点,但从影像图上看,该地区也并不像人们想象中的那样平坦,地形坑坑洼洼,遍布几米甚至几十米直径的环形坑,同时还有大量分布在环形坑底部、坑缘及平面地区大小不等的零散石块(如图1所示)。而且,“嫦娥3号”探测器要实现月面软着陆,需经历距月面15 km耗时、只有十几分钟的动力下降段。在动力下降段中,探测器无法依赖地面测控和人工干预,只能完全依靠自主导航控制,完成降低高度、确定着陆点、实施软着陆等一系列关键动作。但月球着陆器对地面平整度的要求非常高,因此在坡度、石块、环形坑等不确定的复杂月面环境和完全依靠自主导航控制的情形下^[6],为确保探测器实现安全软着陆,就必须突破着陆悬停避障技术。



图1 巡视器全景相机所拍月面图
Fig. 1 The lunar surface photo by the Rover

探测器着陆悬停避障技术,涉及着陆导航敏感器、控制算法、变推力发动机和金属膜片储箱等一系列控制与推进关键技术。通过攻克这些关键技术,设计了高精度、分段减速悬停式无人自主着陆控制方案,研制了测距测速敏感器、高动态激光测距敏感器和激光三维成像仪,以及大范围、高精度、高可靠的无级变推力发动机,从距月面15 km开始动力下降(如图2所示),在主减速段、调整段、接近段、悬停段和避障段分别采取不同制导方式,并结合惯性测量单元,对着陆过程的距离、速度、姿态和地形地貌等进行综合、精确测量,实现大动态、高精度自主着陆导航控制,确保了探测器安全软着陆。

1.3 探测器着陆缓冲与稳定技术

由于月球上是高真空状态,探测器着陆月面过程中不能用降落伞减速,只能采用着陆器底部的变推力发动机反向推进。虽然此方法可降低着陆器的下降速度,但由于发动机火焰会激起月球表面月尘,

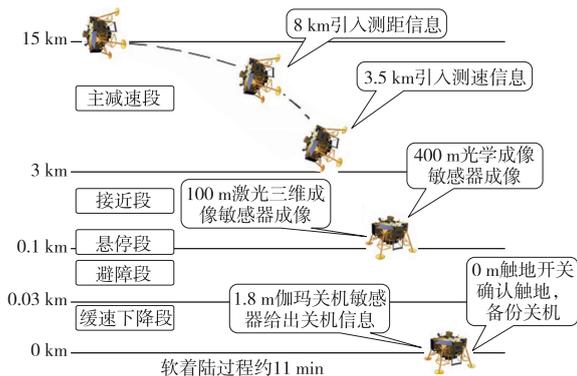


图 2 “嫦娥 3 号”软着陆过程示意图

Fig. 2 The soft landing process of Chang'e-3

因此,发动机必须在距月面一定高度关机,使探测器以一定速度进行自由落体,从而与月面发生着陆撞击。同时,由于月面并不平坦且软硬不一,加之着陆器也不一定是四个腿同时着地,可能有先有后,因此,要确保探测器着陆月面时不会发生损坏、塌陷或倾斜翻滚,实现安全稳定着陆,就必须解决探测器着陆缓冲与稳定技术。

探测器着陆缓冲与稳定技术需要解决着陆缓冲、收拢压紧与展开锁定、抗着陆倾斜翻滚、稳定支撑及防着陆器过度塌陷等问题。通过技术攻关,设计了四腿式着陆缓冲与稳定机构,以平面对称方式安装在着陆器结构下部,每套着陆缓冲与稳定机构为具有吸收能量与缓冲作用的金属腿型结构,由支柱、多功能辅助支柱、足垫和压紧释放装置组成。经验证,成功解决了探测器着陆月面时的安全稳定问题,如图 3 所示。

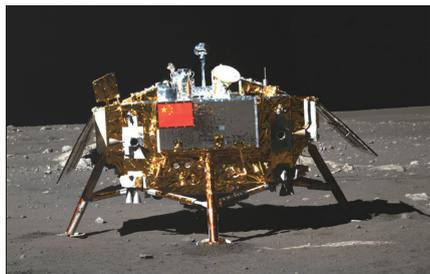


图 3 “嫦娥 3 号”着陆器安全着陆月面图

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

1.4 探测器两器分离与移动操控技术

根据工程总体设计,由着陆器和月面巡视器组成的“嫦娥 3 号”探测器组合体,在飞行与着陆月面前,由着陆器完成各项操控;在着陆月面后,月面巡视器与着陆器实施两器释放分离,并经着陆器转移机构驶抵月面。因此,确保探测器两器安全顺利分

离,以及巡视器月面正常移动操控,成为满足工程要求和实现工程任务目标的关键^[2-4]。

探测器两器分离与移动操控技术涉及巡视器连接解锁与抬升、分离与转移、行进与转向、导航与避障、任务支持与遥操作等一系列新技术。通过技术攻关,研制了多点固定抬升式连接解锁机构、四连杆转移机构,制定了解锁、展开、平移、下降、驶离的两器分离策略,实现了巡视器在复杂着陆姿态和复杂月面地形下的自主安全分离与转移;研制了板式主承力结构、六轮独立驱动、四轮转向机构和筛网式车轮,以及导航与避障相机和自主避障算法,建立了任务支持与遥操作系统,实现了自动导航、自动拐弯、自动选择路线、自动爬坡、自动避障和自主路径规划,满足月面多点就位科学探测要求。巡视器在月面工作如图 4 所示。

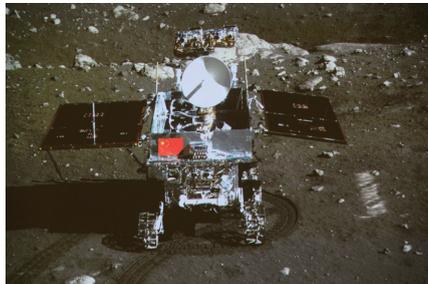


图 4 “嫦娥 3 号”巡视器月面工作图

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

1.5 探测器月夜生存与自动唤醒技术

由于月球自转速度与绕地球公转速度相近,月球的一个昼夜约等于地球的 28 个昼夜,月昼温度高达约 130°C ,月夜温度低至 -180°C 。探测器如果在月球表面工作时间达一个地球月以上,则必然要经历近半个地球月的极端高温月昼和近半个地球月的极端低温月夜。在如此极端恶劣的温度环境下,若不采取新的技术措施,探测器无法保证安全,不是因极端高温使设备损坏,就是因极端低温使设备失效。因此,要保证探测器在月昼高温下长时间安全可靠工作,在月夜极低温下生存与自动唤醒,成为必须面对并解决的关键问题。

通过攻关研究,面对月昼高温和月夜低温交变的生存环境,在月夜期间,采用以放射性同位素(RHU)为热源、氨为工质的气液两相流体回路,实现 1/6 低重力条件下的自动运行,解决热量的有效导入和充分利用问题,确保仪器设备在极低温环境下能维持必要的温度而生存;在月昼期间,综合采用

隔热、导热、辐射、遮阳和工况调整等措施,充分排散大量冗余热量,实现探测器极高温条件下安全可靠工作。在月夜休眠转月昼唤醒时,采用太阳光照使电流和功率增大而自然唤醒的方式,既简化了设计降低了重量,又提高了可靠性^[3]。

1.6 探测器就位与巡视探测载荷技术

“嫦娥 3 号”任务主要包括工程任务和科学探测任务。要实现科学探测任务,首先必须确定科学合理先进的探测任务目标。而科学探测任务目标能否实现,其中关键之一就在于科学合理地确定探测器就位与巡视探测载荷,既要具有先进性和可行性,又要满足科学探测任务目标。

探测器就位与巡视探测载荷技术涉及科学探测载荷的确定和研制。为获得月球降落和巡视区的地形地貌和地质构造,着陆器上携带了降落相机和地形地貌相机,巡视器上携带了全景相机和测月雷达。为开展重要天区光变的长期连续监测和低银道带的巡天观测,观测太阳活动和地磁扰动对地球空间等离子层极紫外辐射的影响,研究该等离子层在空间天气过程中的作用,着陆器上携带了月基天文望远镜和极紫外相机。为开展月表物质成分和可利用资源调查,巡视器上携带了红外成像光谱仪和粒子激发 X 射线谱仪^[7]。研制这些科学探测载荷,既要涉及满足科学探测任务要求所需的一系列载荷专业技术,又要涉及满足工程应用要求的轻量化、小型化技术和月面复杂环境适应性设计等技术。

1.7 多窗口窄宽度高精度发射入轨技术

“嫦娥 3 号”探测器采用我国目前推力最大的“长征 3 号乙”增强型运载火箭发射。根据“嫦娥 3 号”任务特点,火箭必须满足连续 3 天、每天连续 2 个窗口和所带推进剂的限制,要求火箭必须具有更高的发射入轨精度^[3]。因此,如何在“长征 3 号乙”火箭的基础上实现多窗口窄宽度高精度发射,是工程必须解决的关键技术问题。

多窗口窄宽度高精度发射入轨技术,涉及低温推进剂火箭在多个窄窗口条件下的快速在线装订与切换、双激光惯组与卫星导航复合制导、两器多频段 RF 无线转发、长时间滑行热环境与热防护等多项技术。通过技术攻关,显著提高发射可靠性和发射入轨精度,地月转移轨道半长轴偏差由千 km 级提高到百 km 级。

1.8 新体制新频段多目标测控通信技术

根据“嫦娥 3 号”任务特点,探测器首次采用 X

频段测控体制,以提高数据传输速率和测控精度。同时,探测器在落月前是一体飞行,在落月后开始月面工作时,着陆器和巡视器分离为两个测控目标,因此,地面测控通信网需具备多目标测控支持能力。

新体制多目标测控技术包括新建两个深空测控站和组建深空测控网所涉及的多项关键技术,包括大口径高效率天线、超低温制冷接收机、高精度高稳定度氢原子钟、高效多频段大功率发射机、三向测量和同波束干涉测量等技术^[4]。通过技术攻关,有效解决了低信噪比条件下的测控、高数传码速率传输和月面双目标的测控问题,提高了测定轨精度、天地测控性能,实现了有动力条件下的位置确定以及着陆器和巡视器的相对位置确定,研制建设了可覆盖火星探测的深空测控通信网,成功实现了“嫦娥 3 号”任务的高精度测控通信要求,首次开展了月面高真空状态下的 UHF 通信试验。

1.9 地面试验验证技术

针对“嫦娥 3 号”任务的一系列新要求、新技术和新环境,需要在地面进行有效和充分的模拟试验验证^[2,3]。比如,着陆器动力下降时能否有效实现自主悬停避障及缓速下降、着陆月面时能否有效实现着陆缓冲和适应复杂月面环境保持稳定姿态;巡视器在复杂条件下能否有效实现与着陆器分离并移动到月面,在月面巡视勘察时能否适应复杂月面环境(月尘、斜坡、壕沟、岩石等),做到不失稳、不下陷、不翻车、不被卡或者变形;以及各种活动部件月球重力条件下能否有效工作等。

地面试验验证技术涉及一系列试验设备、试验设施、试验环境和试验方法,以确保实际执行任务过程中所有技术在地面得到有效和充分的模拟验证。这些地面试验验证技术是我国以往卫星和其他航天器研制过程中未曾遇到的,如着陆器悬停避障及缓速下降试验验证、着陆冲击与稳定性试验验证、着陆器与巡视器分离释放与转移试验验证、巡视器月面移动及遥操作试验验证等技术,这不仅需要研制专用试验设备、特殊的试验设施、典型的试验环境以及有效的试验方法(如图 5 所示),而且需要在工程研制中并行开展攻关研究并先于飞行产品完成,以便为飞行产品开展地面试验验证创造条件。

1.10 探测器科学探测数据地面接收处理技术

探测器共携带 8 台科学载荷,执行不同的科学探测任务。其中,着陆器携带 4 台科学载荷即降落相机、地形地貌相机、极紫外相机和月基天文望远



图 5 着陆器悬停避障及缓速下降试验设施

Fig. 5 Lander's hover-obstacle avoidance-slowdown test facility

镜;巡视器携带 4 台科学载荷即全景相机、测月雷达、红外成像光谱仪和粒子激发 X 射线谱仪^[3]。根据工程要求,这些珍贵的科学探测数据需要通过地面接收站进行准确接收与处理,有时还需要实时或准实时快速处理,以便及时验证探测效果和科学载荷工作状态。因此,做好科学探测数据地面接收处理是确保“嫦娥 3 号”科学探测任务圆满完成的又一关键。

科学探测数据地面接收处理技术涉及数据接收技术和数据处理技术,而数据处理技术又包括计算机技术、数据反演与解译技术等。通过这些技术攻关,实现科学探测数据的实时或延时接收与记录,各级数据产品的处理与制作以及对科学载荷设备运行状态的监视。

2 结论

当今世界,探测、开发和利用月球,已成为空间科技领域竞争的新的战略制高点。“嫦娥 3 号”工程是我国航天领域迄今最复杂、难度最大的航天工程之一,需要攻克的关键技术多,技术难度大,实施风险高。尤其作为我国自主研制的首个月球软着陆探测器,新技术、新产品高达 80% 以上。本文所列举的 10 大类关键技术只是“嫦娥 3 号”月球软着陆工程所涉及的主要关键技术,篇幅所限,不再一一分析。

太空探索征途漫漫,科技创新永无止境。“嫦娥 3 号”工程任务的圆满完成标志着我国探月工程的一批关键技术取得突破,也为探月工程后续任务奠定了一定技术基础。但随着社会发展和探索未知的不断深入,必然会催生出新的需求和新的航天工程,从而牵引出新的更多的关键技术。这些技术的突

破,将为和平开发利用太空和促进人类科技进步做出更大贡献。

参 考 文 献

- [1] Zheng Y C, Ouyang Z Y, Li C L, et al. China's lunar exploration program: present and future[J]. Planetary and Space Science, 2008,56(7):881-886.
- [2] 孙泽洲,贾阳,张焯,等.嫦娥 3 号探测器技术进步与推动[J].中国科学:技术科学,2013,43(11):1186-1192.[Sun Z Z, Jia Y, Zhang H. The progress and promotion of the Chang'e-3 detector technology[J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(11):1186-1192.]
- [3] 吴伟仁,裴照宇,刘彤杰等.嫦娥 3 号工程技术手册[M].北京:中国宇航出版社,2013.[Wu W R, Pei Z Y, Liu T J. Chang'e-3 engineering technical manual[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House,2013.]
- [4] 吴伟仁,董光亮,李海涛,等.深空测控通信系统工程与技术[M].北京:科学出版社,2013.[Wu W R, Dong G L, Li H T. Engineering and technology of deep space TT&C system[M]. Beijing: Science Press, 2013.]
- [5] 吴伟仁,王倩,任保国,等.放射性同位素热源/电源在航天任务中的应用[J].航天器工程,2013,22(2):1-6.[Wu W R, Wang Q, Ren B G, et al. Application of RHU/RTG in space missions[J]. Spacecraft Engineering, 2013,22(2):1-6.]
- [6] 吴伟仁,王大轶,宁晓琳.深空探测器自主导航原理与技术[M].北京:中国宇航出版社,2011:21-28.[Wu W R, Wang D Y, Ning X L. The principle and technology of deep space autonomous navigation [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2011:21-28.]
- [7] 梁晓华,吴明烨,王焕玉,等.嫦娥 3 号粒子激发 X 射线谱仪红外距离感知方法[J].光谱学与光谱分析,2013,33(5):1360-1363.[Liang X H, Wu M Y, Wang H Y, et al. Near infrared distance sensing method for Chang'e-3 Alpha particle X-Ray spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013,33(5):1360-1363.]

作者简介:

吴伟仁(1953—),男,研究员,博士生导师,国防科工局探月与航天工程中心,中国探月工程副总设计师。主要研究方向:测控通信与航天系统工程技术。

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:wuwr2002@vip.sina.com.

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

[责任编辑:高莎]