

嫦娥工程技术发展路线

裴照宇, 王琼, 田耀四

(探月与航天工程中心, 北京 100037)

摘要:月球是距离地球最近的天体,以其独特的空间位置、广阔的科学探索前景,成为人类地外天体探测和资源利用的首选目标和持续选择。简要总结世界各主要航天大国的探月发展历程和后续计划,详细介绍了我国探月工程(嫦娥工程)“绕”“落”“回”三步走的发展思路和技术路线,分析了后续的发展方向,提出了2030年前月球机器人科研站任务设想。

关键词:月球探测; 技术发展路线; 嫦娥工程; 机器人; 月球科研站

中图分类号: TP242.6; V448.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2015)02-0099-12

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.02.001

0 引言

月球是距离地球最近的天体,以其独特的空间位置、广阔的科学探索前景,成为人类地外天体探测和资源利用的首选目标和持续选择。

20世纪,以美国和苏联为首的世界航天大国开展了大量月球探测活动,取得了一系列成果,带动了相关领域科技与应用快速发展。

美国发射了“先锋”“艾布尔”“徘徊者”“勘测者”“月球轨道器”“探险者”“阿波罗”7个系列以及“克莱门汀”“月球勘探者”共56个月球探测器,遵循从飞越、环绕、硬着陆、软着陆到最终实现载人登月的技术路线,成功率达到66%。苏联发射了“月球号”“探测器号”“宇宙号”“联盟号”等系列64个月球探测器,遵循从硬着陆、飞越、软着陆、环绕、采样返回、巡视的技术路线,成功率仅有32.8%。

进入21世纪后,美国、俄罗斯、欧空局、日本、印度等国家或机构规划实施了多项月球探测活动,月球再次成为国际深空探测的热点。

美国不间断地实施了“月球勘测轨道器(LRO)/月球环形山观测与感知卫星(LCROSS)”“重力回溯及内部结构实验室(GRAIL)”“月球大气与尘埃环境探测器(LADEE)”等多次任务,规划了“资源勘探者(RESOLVE)”任务,还开展了“机器人月球着陆器(RLL)”、可载人的“空间探索车辆(SEV)”等多项技术试验。此外,还曾经实施过宇航

员重返月球的“星座”计划,后来该计划被奥巴马政府取消,并调整为更具挑战性的载人火星探测,但“星座”计划中的重型火箭、月球登陆器、载人飞船都被保留下来。俄罗斯规划了“月球—全球”“月球—资源”两次着陆任务和“月球—土壤”采样返回任务,提出了月球基地、月球轨道站等概念性计划。欧空局实施了“智慧1号(SMART-1)”任务,并规划了包括月球极区着陆器、月球车乃至载人登月、建立月球前哨设施等任务在内的“曙光”深空探索专项计划,以及与俄罗斯合作的“月球极区样本返回”任务。日本实施了“月亮女神”环绕任务,正在研发“月亮女神-2”着陆器和巡视器,规划了可验证载人技术的“月亮女神-X”极区采样返回任务,提出了机器人月球基地、通过国际合作实现载人登月等概念性计划。印度实施了“月船1号”环绕任务,正在开展“月船2号”软着陆和巡视任务。

纵观人类探月活动与未来发展,各国都离不开3个阶段:“探”“登”“驻(住)”^[1]。其中“探”是指无人探月阶段,是人类派出无人月球探测器访问月球、认识月球;“登”是指登月阶段,是航天员登上月球,完成探测后很快返回地球;“驻(住)”也称驻(住)月阶段,包括两层含义:第一层的“驻”是指航天员带着设备降落到月球上,短期停留并把设备安置好,然后返回地球,而将科学设备“驻”留在月球上,以开展长期探测和研究;第二层的“住”是指在月球上建设短期有人照料的月球前哨站或永久性的月球基地。

空间探索任务大多属于重大工程,研制周期长、需要资源多,其发展技术路线的选择十分重要。正确的技术路线会带来工程实施顺利、资源节约等事半功倍的效果,反之则会导致走弯路、浪费资源、周期一推再推的情况。这对于我国这样一个发展中国家尤为重要。本文尝试对空间探索任务的技术路线选择问题进行探讨。首先介绍了我国探月工程(嫦娥工程)的总体发展思路,接下来阐述了“嫦娥 1 号”“嫦娥 2 号”“嫦娥 3 号”任务和三期工程的具体技术路线,最后分析了我国月球探测的未来发展方向,并提出了 2030 年前具体任务设想。

1 嫦娥工程的总体思路

嫦娥工程是一项复杂的多学科、高技术集成的系统工程,极具创新性、挑战性和风险性。如何在当前的技术水平和有限的经费条件下,选择正确的技术路线,使科学目标通过工程的实施变成现实,是首先要回答的问题。要想取得工程的成功,必须要对诸多因

素进行反复衡量、比较、统筹,找到一个平衡点,求出系统的最佳(和谐)配置,找到最佳的性本比,实现整体大于部分之和,达到整体的最优水平^[2]。

2003 年前后,国防科工委组织开展月球探测工程的论证和准备。结合我国当时科技、经济条件,本着实事求是、有所为有所不为的原则,确定以探为主攻方向,分“绕”“落”“回”三步实施,逐步积累知识和经验,循序渐进,不断跨越。步与步之间有机衔接,前一步是后一步的基础,后一步是前一步的跨越;任务与任务承前启后,尽可能利用前一次的成果,为后一次任务多做验证。嫦娥工程总体规划路线如图 1 所示。具体计划如下:

一期工程——“绕”,2004—2008 年,实现对月球的全球性、整体性和综合性环绕探测;

二期工程——“落”,2008—2014 年,实现月球软着陆,对月面进行就位探测和巡视勘察;

三期工程——“回”,2011—2020 年,实现月球样品自动取样并安全返回地球。

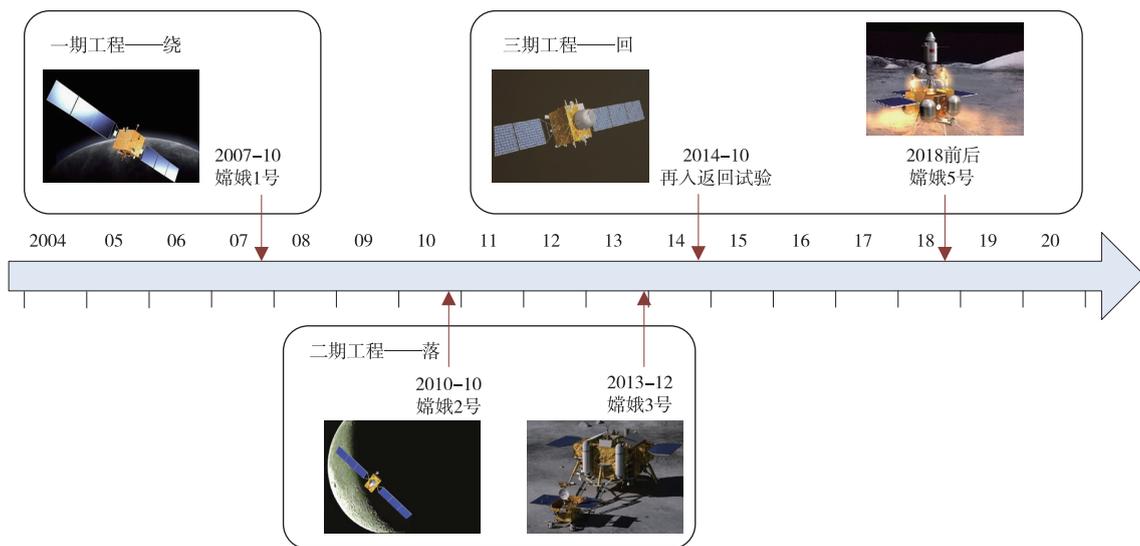


图 1 嫦娥工程总体规划路线图
Fig. 1 Roadmap of the Chang'E Program

2 嫦娥工程的实施

2.1 一期工程(“嫦娥 1 号”)

总的指导思想为快速、可靠、经济地完成“绕”的任务,确定一期工程的技术路线是:充分利用成熟技术、现有条件和装备,经过适应性改进,在有限的资金支持下、在确定的周期内,有把握地完成工程任务。简单地说,就是采用最成熟的技术、最可靠的性能和最低的成本,实现原始创新和集成创新,确保完

成中国首次月球探测任务^[3]。

1) 任务目标选取

在工程目标的选取上,考虑到这是我国首次开展月球探测,应以稳妥可靠为首要原则,重点关注基本技术的突破和初步系统的构建,确定了以下 5 项工程目标^[4]:

- ① 研制和发射我国第一个月球探测卫星;
- ② 初步掌握绕月探测基本技术;
- ③ 首次开展月球科学探测;

④初步构建月球探测航天工程系统;

⑤为月球探测后续工程积累经验。

对于科学目标的选取,工程总体坚持科学创新,根据“有限目标、有所创新、以图为主、兼顾其他”的方针,确定了以下 4 项科学目标^[4]:

①获取月球表面三维影像;

②分析月球表面元素含量和物质类型分布;

③探测地月空间环境;

④探测月壤特性。

围绕这四项科学目标,选用 CCD 立体相机、干涉成像光谱仪、微波探测仪、激光高度计、 γ/X 射线谱仪、高能粒子探测器、太阳风离子探测器 7 个载荷,实现多手段探测。

2) 任务设计

飞行任务过程规划为发射、调相轨道运行、地月转移、近月制动、环月运行 5 个阶段。

采用轨道拼接、自后往前的方法进行轨道设计。根据科学探测需求和轨道自维持能力,设计首次月

球探测的使命轨道为高度 200 km 的极月圆轨道;出于稳妥和减小重力损耗的考虑,设计 3 次近月点减速机动,分别将轨道调整为周期 12 h 的大椭圆轨道、周期 3.5 h 的椭圆轨道和周期 127 min 的圆轨道;根据发射方案、火箭能力和轨道光照条件,选择确定倾角 31° 、飞行时间 114 h 的地月转移轨道(LTO);出于稳妥、减小重力损耗、延续发射天数、有利于飞控等考虑,设计一次远地点加速和 3 次近地点加速机动,分别将轨道调整为周期 16 h、24 h、48 h 的椭圆轨道和 LTO。

发射窗口包括发射机会及每次发射机会可延续的时间间隔两部分^[5]。根据火箭能力和卫星光照要求,每月可保证一次发射机会。考虑到运载火箭系统和发射场系统组织发射的要求,将每次发射机会的可连续发射天数延长至 3 天,且每天的发射窗口宽度设为 35 min。

“嫦娥 1 号”任务轨道如图 2 所示^[5]。通过“嫦娥 1 号”,基本掌握了到达月球的轨道设计能力。

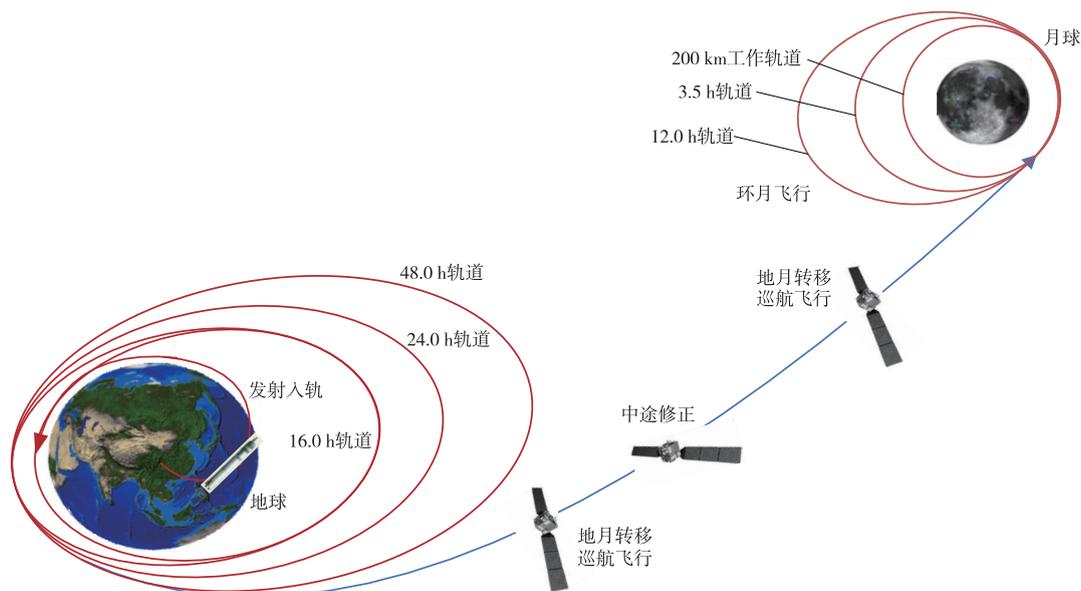


图 2 “嫦娥 1 号”任务轨道
Fig. 2 Trajectories of Chang'E-1 mission

3) 系统构建

“嫦娥 1 号”卫星的平台选择了我国“东方红 3 号”卫星的公用平台,当时该平台已成功用于 7 颗通信卫星,是一个成熟可靠的平台。在该平台基础上,结合其他卫星的经验和技术成果进行重新设计,以满足探月任务的特殊要求。

运载火箭选用“长征 3 号甲”火箭。到工程立项之时,该火箭已成功完成了 8 颗卫星的发射任务,成

功率 100%,且其中 7 颗是使用“东方红 3 号”卫星平台的卫星,星箭接口协调一致。对“长征 3 号甲”火箭进行适应性设计和改进后,其运载能力、入轨精度等技术性能完全可以满足任务需求。

发射场选用西昌卫星发射中心。该中心纬度低,适用于我国地球同步轨道(GTO)卫星等高轨卫星的发射。截至工程立项,该发射中心已成功完成了 35 次卫星发射任务,是技术、设施、经验都十分成

熟的发射场。对该发射中心的相关设施进行适应性改进后,完全可以满足超 GTO 轨道发射的工程要求。

测控系统由我国当时已有的统一 S 频段航天测控网(USB),辅以甚长基线干涉天文测量系统(VLBI)组成。S 频段航天测控网先后圆满地完成了我国历次火箭和卫星的测控通信任务,是比较完善的卫星测控通信网。VLBI 测轨分系统具有很高的测角精度。这两者配合,可以满足“嫦娥 1 号”卫星远距离、高精度的测控要求。此外还通过开展国际协作,增加测控覆盖率。研制中期,又新建了喀什和青岛两座 18 m 接收天线,提高星地测控链路电平余量。

地面应用系统是个全新的系统,通过新建密云 50 m 和昆明 40 m 两座数据接收天线和总部相关设施设备,具备了科学数据接收、处理和解译的能力。

4) 实施效果

“嫦娥 1 号”于 2007 年 10 月 24 日成功发射,至 2009 年 3 月 1 日受控撞月,共在轨运行 494 天,圆满完成了既定使命,实现中华民族千年奔月梦想,树立我国航天史上的第三个里程碑。“嫦娥 1 号”在 1 年设计寿命期满后,又开展了多项拓展任务,获取了大量的科学探测数据,大大丰富了对月球的认识。同时,通过一期工程的实施,在以下 9 个方面取得了技术创新,为后续任务奠定了坚实基础^[5]:

- ① 总体集成技术;
- ② 轨道设计技术;
- ③ 环境适应和能源技术;
- ④ 飞行控制技术;
- ⑤ 远距离测控通信技术;
- ⑥ 高精度测定轨技术;
- ⑦ 火箭可靠性增长技术;
- ⑧ 月球科学探测、数据接收与研究技术。

总的来说,为了确保我国首次月球探测这个创新性任务的首发成功,这条技术路线利用成熟技术进行集成创新,以掌握能力为主,在技术上有所求稳。实践证明,这条技术路线充分体现了确有把握、确有创新、确有带动的 3 条原则,全面实现了工程系统的全局优化和系统工程的全局统筹,用比较少的投资和较短的时间,又好又快地完成绕月探测的任务。

2.2 二期工程

2.2.1 “嫦娥 2 号”(二期工程先导任务)

在“嫦娥 1 号”任务圆满成功之后,嫦娥工程二

期立项,其主要目标是实现月面软着陆和巡视勘察。考虑到其关键技术多、技术跨度大、实施难度高,为降低月面软着陆技术风险、积累工程经验,决定利用“嫦娥 1 号”备份星,进行适应性改进,作为二期工程先导星,先期验证落月的部分关键技术,并对预选着陆区进行高分辨率成像。

“嫦娥 2 号”的技术路线是:创新设计多目标顶层任务,充分继承成熟技术和产品并进行性能和功能升级,突破相关新技术,提升系统整体能力,形成并验证适用的行星际探测新平台。简单地说,就是通过综合集成创新牵引成熟技术升级和新技术突破,实现任务级创新和应用创新,确保完成行星际多目标探测任务^[6]。

1) 任务目标选取

“嫦娥 2 号”兼顾了技术验证和科学探测。围绕技术验证的任务需求,确定多个试验验证和深空探测新技术验证项目。其工程目标为^[7]:

- ① 突破运载火箭直接将卫星发射至 LTO 的发射技术;
- ② 验证 100 km 月球轨道捕获技术;
- ③ 验证 100 km × 15 km 轨道机动与快速测定轨技术;
- ④ 对“嫦娥 3 号”任务预选着陆区——虹湾地区进行高分辨率成像试验;
- ⑤ 试验 X 频段深空测控技术,验证深空测控体制;
- ⑥ 试验 12 Mbps 高速数据传输和低密度奇偶校验码(LDPC)遥测信道编码、轻小型 CMOS 监视和降落相机等高新技术。

科学探测方面基本与“嫦娥 1 号”相同,以获取高分辨率全月图为侧重,确定以下 4 项科学目标^[7]:

- ① 获取月球表面三维影像,分辨率优于 10 m;
- ② 探测月球物质成分;
- ③ 探测月壤特性;
- ④ 探测地月与近月空间环境。

“嫦娥 2 号”配置了 7 台有效载荷设备,与“嫦娥 1 号”基本相同,但去掉了干涉成像光谱仪。重新研制了更高分辨率的 TDI-CCD 立体相机和更高重复频率的激光高度计;对 X 射线谱仪和 γ 射线谱仪进行了改进升级,提升了探测能力;微波探测仪、太阳高能粒子探测器、太阳风离子探测器基本保持不变。

进入拓展任务阶段后,基于“加速提升能力、推

进技术发展”的思路,以验证距地更远的行星际探测技术、积累深空探测工程经验为目标,深化论证了扩展任务阶段的试验项目。按有序衔接、分步实施的原则,最大限度地发挥卫星潜能,以跨越行星际、突破新距离为基本目的,设计了月球轨道深化探测、日一地拉格朗日 L2 点环绕探测、4179 小行星飞越探测等 3 阶段、多目标探测任务。

2) 任务设计

飞行任务过程规划为发射、地月转移、近月制动、环月运行 4 个阶段。

“嫦娥 1 号”是首发任务,其调相轨道设计比较稳妥可靠,但飞行时间较长。而作为技术验证性任务的“嫦娥 2 号”则采用了更加高效的直接 LTO 发

射。运载火箭将卫星直接送入近地点高 200 km、倾角 28.5° 、飞行时间 112 h 的 LTO;卫星到达 100 km 高的近月点后,分 3 次实施近月制动,分别将轨道调整成周期 12 h、3.5 h 的椭圆轨道和高度 100 km 的极月圆轨道。在 100 km 的环月轨道上运行时,择机在月球背面制动将近月点降到 15 km,对虹湾进行高分辨率成像。

与“嫦娥 1 号”类似,“嫦娥 2 号”在每月有一次连续 3~4 天的发射机会,每次发射机会中每天只有一个宽度为 35 min 的发射窗口。

“嫦娥 2 号”任务轨道如图 3 所示^[8]。通过“嫦娥 2 号”,验证了“嫦娥 3 号”任务直接地月转移轨道发射的技术。

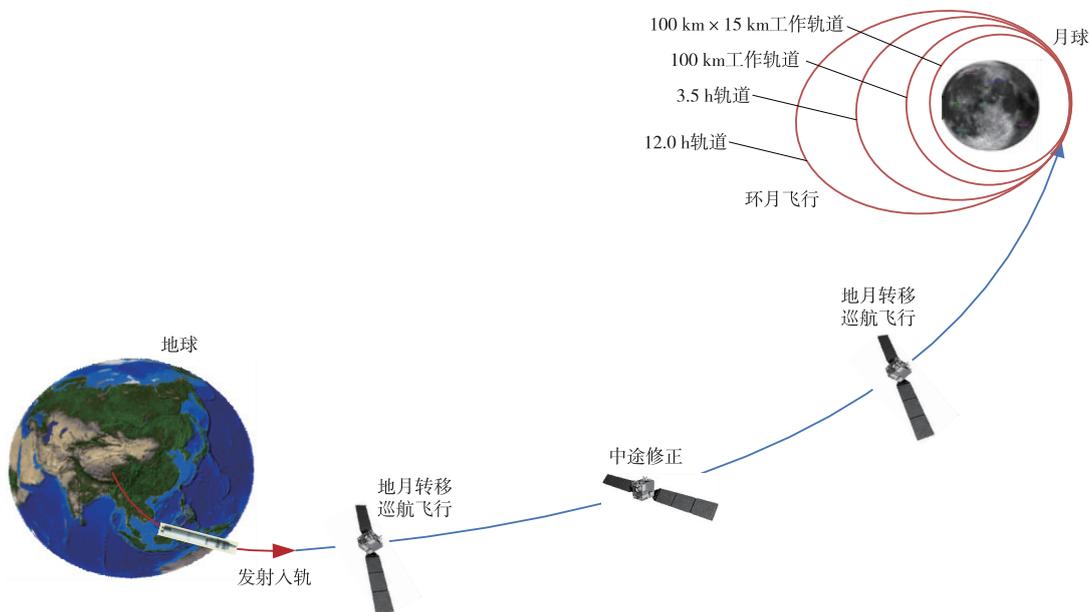


图3 嫦娥2号任务轨道
Fig. 3 Trajectories of Chang'E-2 mission

3) 系统构建

卫星平台沿用“嫦娥 1 号”卫星大部分设备产品,并进行改进升级,提升了推进能力、测控通信和数传能力、机动飞行能力、热控适应能力、科学探测能力;新增技术试验分系统包含了所有新技术验证设备;为深化科学探测,有效载荷设备或新研或大改。

运载火箭选用能力更强的“长征 3 号丙”运载火箭,对火箭进行适应性改进以提高入轨精度,满足直接 LTO 发射的任务需求。

发射场仍采用西昌卫星发射中心,进行适应性改进。

测控通信系统沿用经过“嫦娥 1 号”任务检验的测控体制和设施设备,对两座 18 m 天线进行改造升级,并开展深空测控新技术试验。在任务后期,利用二期工程新建成的喀什 35 m、佳木斯 66 m 大型深空站和上海 65 m VLBI 站开展了空间测试和标校试验,验证新研设备的正确性和协调性。

地面应用系统基本与“嫦娥 1 号”任务相同,做了一些适应性改进。

4) 实施效果

“嫦娥 2 号”卫星于 2010 年 10 月 1 日发射,至 2011 年 4 月 1 日半年设计寿命期满,全面实现既定的六大工程目标和四大科学探测任务。随即于

2011年4月下旬至5月底,开展了补拍月球南北两极漏拍点和再次对“嫦娥3号”预选着陆区进行高清晰成像拓展试验。2011年8月25日起,“嫦娥2号”环绕日地L2点进行了为期10个月的科学探测,获得了地球远磁尾离子能谱、太阳耀斑爆发和宇宙伽马爆的科学数据。2012年12月13日近距离飞越探测4179图塔蒂斯(Toutatis)小行星,并对其进行光学成像。此后“嫦娥2号”一直朝向更远的深空飞行。

“嫦娥2号”任务取得了以下8个方面技术创新^[9]:

①国际上首次获得7 m分辨率全月图,优于1.5 m局部影像图;

②国际上首次实现从月球轨道飞向日地拉格朗日L2点,开展科学探测;

③首次实现4179小行星探测;

④获取了一批重要科学探测数据,首次发现月表铬元素、微磁层、太阳风加减速;

⑤突破直接LTO发射和飞行技术;

⑥突破近月点15 km轨道短弧段、快速测定轨技术,建立了我国自主知识产权的月球重力场模型;

⑦首次成功实现100 km×100 km和100 km×15 km环月探测;

⑧首次验证X频段深空测控、LDPC遥测信道编译码等技术。

实践证明,这条以顶层任务创新和系统集成创新带动成熟技术升级和新技术突破的技术路线,用很少的投资和较短的时间,又好又快地实现了多目标多任务探测的任务级成果,奠定了行星际及小行星探测器平台及相关核心技术基础,创造了“低成本、高质量、高回报”深空探测任务的典范。

2.2.2 “嫦娥3号”(二期工程主任务)

作为二期工程主任务,“嫦娥3号”要实现月球表面的软着陆和巡视勘察。相比“嫦娥1号”“嫦娥2号”的绕月飞行,“嫦娥3号”任务的技术跨度极大,着陆、巡视这两大关键环节的相关技术都没有成熟技术可以继承,需要攻关突破,而且整器大部分产品需要新研。但另一方面,经过几十年的发展和“嫦娥1号”任务的实施,中国航天已经具备了相当的技术实力。在这种情况下,确定其技术路线为:瞄准当今世界发展水平,高起点地确定功能与性能指标;以航天几十年来积累的技术能力为基础,针对新领域中所遇到的新问题,完全自主地进行技术上的原始

创新和集成创新,通过大量的设计分析、关键技术攻关和地面验证试验,以正面攻坚的方式全面突破月球软着陆和月面巡视的核心关键技术^[10]。

1)任务目标选取

围绕二期工程的核心任务,确定“嫦娥3号”的工程目标^[11]:

①突破月球软着陆、自动巡视勘察、深空测控通信、月夜生存等关键技术,提升航天技术水平;

②研制月球软着陆探测器和巡视探测器,建立地面深空站,获得包括运载火箭、探测器、深空站在内的功能模块,具备月球软着陆探测的基本能力;

③建立月球探测航天工程基本体系,形成重大项目实施的科学有效的工程管理方法以及人才队伍,推动我国深空探测活动的持续发展。

科学目标为^[11]:

①月表形貌与地质构造调查;

②月表物质成分和可利用资源调查;

③日地月空间环境探测和月基光学天文观测。

围绕上述科学目标,采用多个谱段和多种探测手段,确定在着陆器配置地形地貌相机、月基光学望远镜、极紫外相机、降落相机4种有效载荷,在巡视器配置全景相机、测月雷达、红外成像光谱仪、粒子激发X射线谱仪4种有效载荷。各有效载荷既相互协同工作,共同完成科学探测任务,又各有侧重点;既包括标准配置仪器,如光学相机,又包含具有独创性的仪器,如极紫外相机、测月雷达等。

2)任务设计

飞行任务过程规划为发射、地月转移、环月、动力下降、月面工作5个阶段。

“嫦娥3号”着陆区的选择遵循工程技术上可行、科学上有特色的原则,确定着陆区为 $42.6^{\circ}\sim 45.6^{\circ}\text{N}$ 、 $18.2^{\circ}\sim 34.6^{\circ}\text{W}$ 。

与前两次探月任务类似,“嫦娥3号”轨道也采用自后向前的方法进行设计:首先对着陆区的光照和测控条件进行分析,确定满足着陆条件的时机,然后确定着陆前的环月轨道参数和运动特性,再依据地月转移轨道的特性分析,共同确定地月转移轨道的范围,最后依据运载火箭和地面测控的能力约束,共同确定满足大系统约束的发射窗口。

在西昌卫星发射中心,采用“长征3号乙”运载火箭,将探测器送入近地点高200 km、倾角 28.5° 、飞行时间112 h的大椭圆LTO。探测器与火箭分离后,经中途修正,在近月点实施一次制动,实现月

球捕获,进入 100 km 高的极月圆轨道。在环月圆轨道运行期间,探测器择机实施轨道机动,进入 $100\text{ km} \times 15\text{ km}$ 的椭圆轨道。在椭圆轨道运行期间,探测器择机从 15 km 近月点实施软着陆制动,先后完成主减速、快速调整、接近、悬停、避障、缓速下降等动力下降过程,实现月面软着陆。着陆后,巡视器和着陆器分离,两器各自开展科学探测。

“嫦娥 3 号”不再采用“嫦娥 1 号”“嫦娥 2 号”的 35 min 宽发射窗口,而改为每天两个相隔 40 min 以

上的发射窗口,第一窗口宽度 4 min,第二窗口宽度 1 min。这样一来,通过提升发射场和运载火箭系统组织发射的能力,既能大幅减少探测器用于修正发射时间偏差的推进剂携带量,又能保证发射窗口切换时间的需求。

“嫦娥 3 号”任务轨道如图 4 所示^[11]。通过“嫦娥 3 号”,验证了三期工程探测器的前半段飞行轨道——即从发射到月球着陆的飞行轨道。

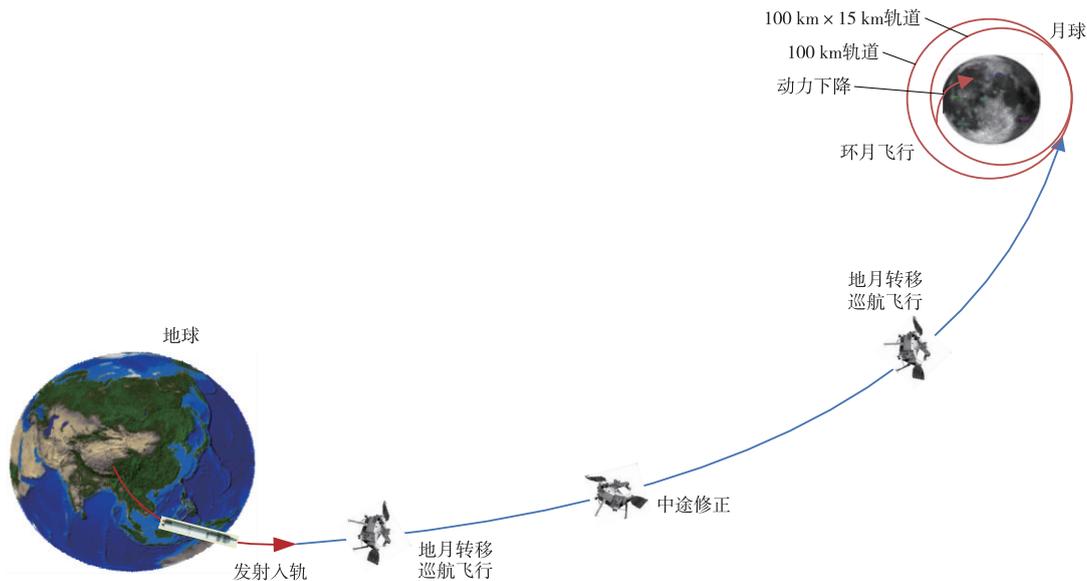


图 4 “嫦娥 3 号”任务轨道

Fig. 4 Trajectories of Chang'E-3 mission

3) 系统构建

“嫦娥 3 号”探测器是一个全新的航天器,新技术和新产品的比例高达 80%。通过自力更生、集智攻关,突破着陆器制导导航与控制、推进、着陆缓冲、热控制和巡视器移动、自主导航与遥操作控制等一系列关键技术,新研月球着陆器和巡视器;新建特种试验设施,突破地面试验,满足仿真与地面试验验证的需求。

运载火箭选用我国当时能力最强的“长征 3 号乙”火箭,采取多种改进措施来提高运载能力、入轨精度、可靠性及关键动作监视能力,满足多窗口多弹道发射的任务需求。

发射场仍采用西昌卫星发射中心,进行同位素源存储厂房、RF 转发等适应性改进,满足“长征 3 号乙”运载火箭和“嫦娥 3 号”探测器的测试、发射需求。

测控通信系统除了传统的 USB 测控网加

VLBI 测轨分系统外,新建喀什 35 m、佳木斯 66 m 大型深空站组成深空测控网,新建上海 65 m VLBI 站提高了 VLBI 观测精度,并采用同波束干涉、相对差分单向测距等技术,进一步提升测定轨精度和测控距离,以满足任务需求。

地面应用系统对原有设施设备进行了适应性改进,并新建遥科学实验室,进一步提升科学载荷任务规划和科学数据处理、解译能力。

4) 实施效果

2013 年 12 月 2 日,“长征 3 号乙”运载火箭成功发射,并以极高的精度将“嫦娥 3 号”探测器送入地月转移轨道。12 月 14 日,“嫦娥 3 号”成功着陆在月球北纬 44.12° 、西经 19.51° 的预选虹湾着陆区,着陆精度优于 1 km;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,标志着任务圆满成功;随后,两器各自独立开展了相应的多种科学探测任务,获取了大量探测数据。目

前,着陆器已经度过了一年寿命期,仍在开展探测;巡视器在行驶了 114 m 后,遭遇了移动系统控制故障,无法继续前进。

“嫦娥 3 号”的圆满成功,为我国航天事业发展树立了新的里程碑。通过“嫦娥 3 号”的实施,在以下 7 个方面取得了技术创新^[12]:

①国际首次实现基于全自主避障的月球软着陆,使我国成为国际上第三个完成月球软着陆的国家;

②首次实现我国航天器在地外天体巡视;

③国际首次采用低重力辅助两相流体回路和光照唤醒技术,实现了探测器在极低温度环境下的月夜生存和自主唤醒;

④首次突破我国 LTO 高精度入轨和低温火箭多窗口、窄宽度发射技术;

⑤首次研制我国大型深空站,初步建成覆盖行星际的深空测控通信网,实现了我国深空测控的重大跨越;

⑥首次研制建设了一系列高水平特种试验设施,创新形成了一系列先进试验方法、规范和标准;

⑦我国首次开展月面就位和巡视探测,获得国际多项首创科学成果。

实践证明,这条以正面攻坚方式实现新技术突破的技术路线,稳打稳扎,步步为营,基本按照预定计划,全面攻克了各项关键技术,较好地完成了月球软着陆任务和巡视探测任务,大大夯实和提升了我国航天技术水平。

2.3 三期工程

2.3.1 再入返回飞行试验任务(三期工程试验任务)

三期工程的任务是发射“嫦娥 5 号”^{*}实现月面采样返回,需要突破月面采样、月面起飞、月球轨道交会对接、高速再入返回等 4 项核心关键技术,其中最为艰巨的尤数高速再入返回技术。考虑到对地球大气特性认识尚不充分、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,地面试验验证条件欠缺,为降低工程风险,决定在三期工程中安排一次再入返回飞行试验。其技术路线为:紧紧围绕技术验证的核心目标,充分利用最成熟的技术、产品和手段来验证新技术,尽可能降低风险、提高工程实施可靠性。

1) 任务目标选取

围绕再入返回飞行试验的核心任务,确定任务

目标为:获取高速半弹道跳跃式再入返回过程的试验数据;验证和完善再入返回的设计模型;突破再入返回的气动力、热防护、GNC 等关键技术。验证高速半弹道跳跃式再入的测控与回收能力。验证月地转移轨道飞行和测控能力。

进入拓展阶段后,以最大限度地发挥服务舱潜能,验证后续任务相关技术、积累深空探测工程经验为目标,设计了地一月拉格朗日 L2 点环绕飞行、月球轨道交会试验、“嫦娥 5 号”预设采样区成像等多阶段、多目标拓展任务。

2) 任务设计

飞行任务过程包括发射、地月转移、月球近旁转向、月地转移、返回再入和回收着陆 6 个阶段。

出于简化设计、降低风险考虑,采用绕月自由往返轨道作为地月和月地转移轨道,设计了借助月球引力改变轨道倾角的月球近旁转向段,完整模拟了嫦娥五号返回器的再入返回过程。综合考虑“嫦娥 5 号”任务再入航程的需求和其他因素的影响,确定绕月自由往返轨道的飞行时间约为 8 天。每个月的发射机会主要由“嫦娥 5 号”任务再入航程需求范围要求决定,发射机会确定为每月航程需求最短的连续 3 天。

运载火箭将飞行器发射进入近地点 200 km、远地点约 41 万 km、倾角 28.5° 的地月转移轨道,飞行器经过月球近旁转向后,进入倾角 45° 的月地转移轨道。在到达预定的约 5 000 km 高的分离点位置时,舱器分离,返回器以半弹道跳跃式的方式再入大气层,完成再入着陆任务。

再入返回飞行试验任务轨道如图 5 所示^[13]。通过再入返回飞行试验,验证了“嫦娥 5 号”返回器的再入返回过程。

3) 系统构建

飞行器由服务舱和返回器两部分组成。返回器与“嫦娥 5 号”返回器技术状态基本一致,均继承了神舟飞船返回舱外型;为返回器提供支撑平台的服务舱则继承了成熟的“嫦娥 2 号”卫星平台,并进行了技术改进。

运载火箭选用“长征 3 号丙”运载火箭,对火箭进行适应性改进,满足绕月自由返回轨道发射的任务需求。

^{*} 由于有“嫦娥 3 号”的备份星待发射,故将第三期主体任务载体编号为“嫦娥 5 号”。——编者注

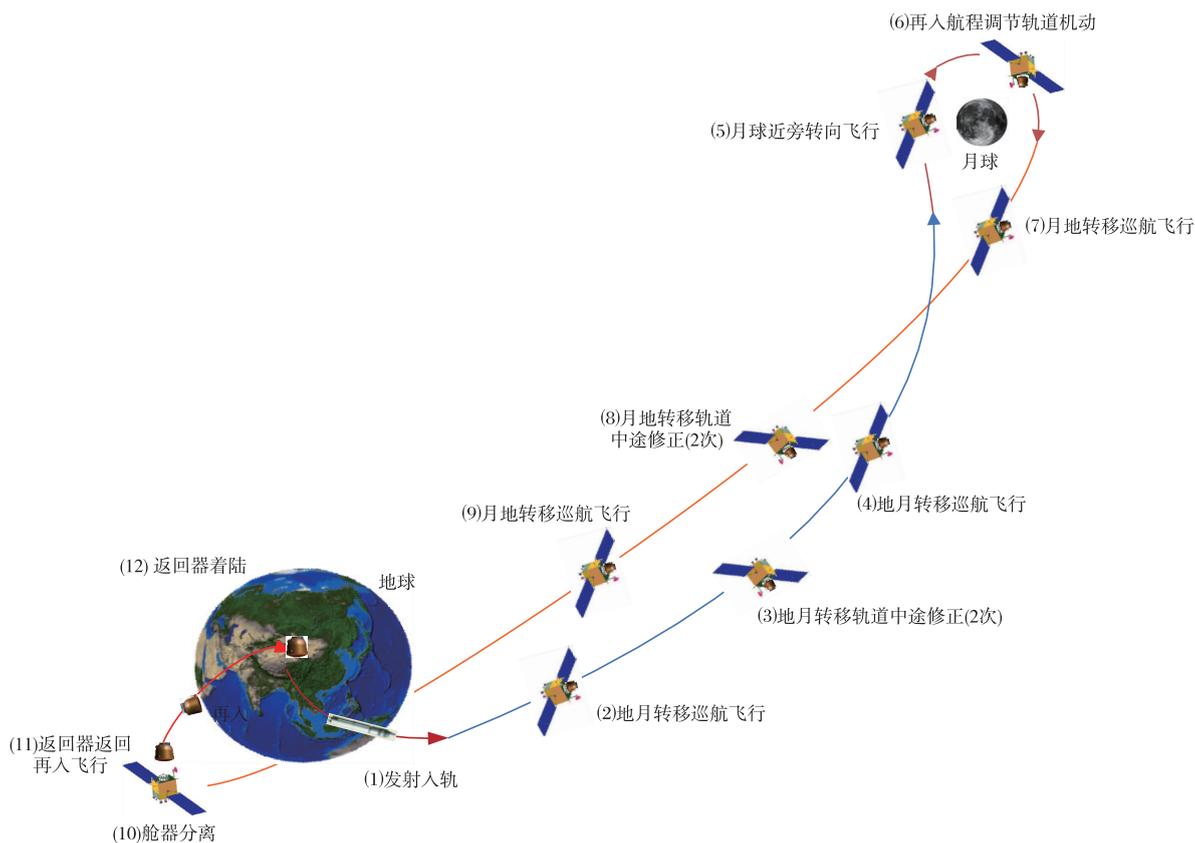


图 5 再入返回飞行试验任务轨道
Fig. 5 Trajectories of the re-entry test mission

发射场仍采用西昌卫星发射中心。

测控与回收系统沿用经过“嫦娥 3 号”任务检验的测控体制和设施设备,并新增了再入测量分系统和搜索回收分系统,在继承载人航天工程地面设备的基础上进行改造和新研,满足运载火箭、飞行器测控任务和返回器搜索回收任务的需求。

4) 实施效果

2014 年 10 月 24 日,飞行器由“长征 3 号丙”运载火箭送入绕月自由往返轨道。11 月 1 日,返回器在内蒙古自治区四子王旗预定区域成功高精度着陆,标志着三期工程取得突破性进展,为全面完成嫦娥工程三步走战略目标打下了坚实基础。

通过月球借力,服务舱于 11 月 27 日进入环绕地月 L2 点的轨道飞行,为未来在地月 L2 点部署中继卫星等任务验证了轨道转移技术,积累了飞行经验;2015 年 1 月服务舱重返月球轨道后,开展了调相控制、远程导引飞行等交会试验,验证了“嫦娥 5 号”任务交会对接方案。

再入返回飞行试验任务取得了以下 6 方面技术创新^[14]:

①突破了高速再入返回气动设计、分析与验证技术,实现了我国在高空高速空气动力学的跨越;

②突破了以第二宇宙速度、两次再入大气层的热防护技术,研制成功了深空半弹道跳跃式再入返回的最轻质防热系统;

③突破了半弹道跳跃式再入返回自主制导导航与控制技术,实现了世界上最高精度的深空再入返回;

④突破了大倾角变轨道空间借力飞行技术,实现了高精度绕月自由往返轨道飞行;

⑤突破了深空跳跃式高速再入返回跟踪测量和搜索回收技术,实现了国内最大速度、最长航程、最大范围的测控回收;

⑥突破了双平台飞行器系统技术,实现了多目标多任务深空探测。

实践证明,这条充分利用成熟技术来为掌握核心新技术创造有利条件的技术路线,用比较少的投资和较短的时间,突破了深空高速再入返回的多项关键技术,又好又快地完成了既定任务。

2.3.2 “嫦娥 5 号”(三期工程主任务)

三期工程的任务是实现月面采样返回。相比二期工程,三期工程在技术上又向前跨进了一大步,从月球着陆之后直到地球再入返回的众多关键环节的相关技术也都没有成熟技术可以继承,需要攻关突破。另一方面,经过嫦娥工程一期、二期共 3 次任务的实施,我国深空探测技术实力取得长足进步,具备开展更高难度任务的能力。针对这种情况,确定三期工程技术路线为:瞄准世界领先水平,集成我国最高水平航天技术基础,高起点地确定功能与性能指标;继承二期工程软着陆平台,完全自主地进行技术上的原始创新和集成创新,以正面攻坚的方式突破月球采样返回、新型运载火箭、新发射场的核心关键技术。

1) 任务目标选取

围绕三期工程的核心任务,确定“嫦娥 5 号”的工程目标为:

①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;

②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;

③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。

以月球样品和现场数据的比对研究为重点,确定科学目标为:

①着陆区的现场调查和分析;

②月球样品的分析与研究。

围绕上述科学目标,配置降落相机、全景相机、月球矿物光谱分析仪、月壤结构探测器 4 台科学探测载荷,实现可见光、红外、微波等多谱段探测。

2) 任务设计

飞行任务过程规划为发射、地月转移、近月制动、环月飞行、着陆下降、月面工作、月面起飞上升、交会对接与样品转移、环月等待、月地转移、再入回收共 11 个阶段。

由于射前操作繁杂,海南发射场气象条件复杂,需要保持一定的发射窗口宽度来降低工程风险。考虑到三期工程复杂性和“长征 5 号”火箭的技术特点,确定保留 50 min 的发射窗口。运载火箭采用 5 条弹道、每条弹道覆盖 10 min 发射窗口宽度的方法,同时满足 50 min 发射窗口的要求和探测器系统 ± 5 min 发射轨道修正能力的限制。

受到运载火箭发射质量的限制,地月和月地转移轨道均选择了飞行时间约 5 天左右入射能量最优轨道。为了尽可能减小对再入航程的需求,月地转移入射机会选择在月球相对地球赤纬为最南纬的前后几天。采样区的选择遵循工程技术上可行、科学上有特色的原则,确定采样区为风暴洋区域。

探测器由运载火箭发射进入近地点高 200 km、飞行时间 112 h 的能量最优 LTO;到达近月点实施两次近月制动后,进入高度 200 km 的环月圆轨道。与轨返组合体分离后,着陆上升组合体经过一次降轨变轨,开始动力下降。经过 2 天的月面工作,上升器与着陆器分离,开始起飞上升进入 $15\text{ km} \times 180\text{ km}$ 的目标轨道。经过约 2 天的交会,上升器与轨返组合体完成对接,并转移月球样品至返回器,随后分离。经过约 6 天的环月等待飞行,轨返组合体进入 112 h 的能量最优月地转移轨道。在距地面高度约 5 000 km 的分离点,返回器与轨道器分离,返回器跳跃式再入大气层,完成再入回收^[15]。

3) 系统构建

探测器系统新研由着陆器、上升器、轨道器、返回器组成的全新探测器,完成地月转移、环月、月面软着陆。着陆器在继承“嫦娥 3 号”的基础上增强了着陆缓冲能力,上升器和着陆器采用一体化复用设计,返回器继承了神舟飞船返回舱外型。

运载火箭采用我国新研制的、目前推力最大的“长征 5 号”运载火箭,以获得足够的 LTO 运载能力。

发射场选用我国新建设的海南发射场,与“长征 5 号”运载火箭相适应。该发射场比西昌纬度更低,能够提高火箭运载能力,并且位于海边,火箭航落区安全条件更好。

测控与回收系统沿用经过“嫦娥 3 号”任务检验的测控体制和设施设备,并新建南美 35 m 深空站、纳米比亚 18 m 测控设备等,完善深空测控网和近地航天测控网;新增了再入测量分系统和搜索回收分系统,在继承载人航天工程地面设备的基础上进行改造和新研,满足运载火箭、探测器测控任务和返回器搜索回收任务的需求。

地面应用系统在二期工程基础上进行适应性改造,并新增月球样品存储实验室和异地容灾备份存储实验室,新建密云 35 m 数据接收天线,满足三期工程月球样品存储和数据接收、处理和解读的任务需求。

3 我国月球探测的未来发展

从各国后续探月计划可以看出:

- 1) 月球仍为各国深空探测的热点;
- 2) 资源探测和利用成为月球探测的重要方向;
- 3) 构建月球基地是长远发展目标;
- 4) 突破技术瓶颈为当务之急。

世界各航天大国或组织均已意识到,月球作为距离地球最近的天体,既是研究地月系统演化等科学问题的最佳目标,又是开发与利用资源的宝贵平台,还是验证太空长期驻留能力的试验场、进军更深空的跳板。我国在完成嫦娥工程“绕”“落”“回”三步走之后,将跻身于月球探测技术先进国家行列。面对各航天大国的激烈竞争,我国理应乘势而上,持续开展月球探测,推动探测器技术和月球科学的发展,力争在国际上实现从“追赶者”到“领跑者”的跨越。

基于当前认识,后续我国月球探测可分为载人探测和机器人探测两个方向。往载人探测方向发展,实现载人登月,最终实现可容纳人类宇航员长期驻留的月球基地,概括为“探、登、驻(住)”三步;往机器人探测方向发展,深化月球科学探测并验证资源开发与利用、生物再生生命保障等技术,最终实现机器人长期驻留工作、短期可容纳宇航员造访的月球基地,即“探、用、驻(住)”。出于技术跨度、火箭选型、经济可承受性、效费比等方面因素考虑,我国后续月球探测应继续朝着机器人探测方向发展,在未来条件成熟时,启动载人探测方向。

倘若按照空间技术、空间应用和空间科学三大领域来区分月球探测活动,目前实施的嫦娥工程主要以空间技术为主,兼顾空间科学,通过工程实施奠定技术基础,实现科学探测;而后续的发展应该逐步过渡到空间应用和空间科学并重。

初步设想我国在 2030 年前通过实施 3 次任务,着陆在同一地点,建成具备科学探测、科研试验和资源利用技术验证的综合功能月球机器人科研站,完成月球资源开采和利用、生物再生生命保障等技术验证,实现机器人月球探测大三步走中第二步“用”的目标,并从空间技术逐渐过渡到空间科学和空间应用。具体任务设想如下:

- 1) “勘”,勘察月球环境和资源;
- 2) “建”,建立长期基础科研平台;
- 3) “用”,开采利用资源技术验证。

各次任务发射时间相隔 4~5 年,实现一定的技术跨越,前一次任务尽可能对后一次任务的实施开展先期验证,后一次任务通常作为前一次任务技术的深化和应用。

4 结 论

基于我国在 20 世纪初的技术和经济条件,确定嫦娥工程以“探”为主攻方向,分“绕”“落”“回”三步实施。每步之间,前一步是后一步的基础,后一步是前一步的跨越。每次任务之间,承前启后,充分利用前次的技术,尽可能为后次任务多做验证。通过“嫦娥 1 号”“嫦娥 2 号”“嫦娥 3 号”任务和再入返回飞行试验任务四战四捷的良好效果来看,这样一条嫦娥工程技术路线做到了:起步晚但起点高;投入少但产出多;任务次数少但覆盖内容全;整体能力快速发展,迅速晋升为国际先进。

由于低成本、高回报、灵活性强、能够兼顾载人探测发展需求等突出优势,机器人探测将成为未来较长时期内月球和深空探测的主要方式。通过 3 次同一地点着陆任务,建成多功能月球机器人科研站,实现机器人月球探测“探、用、驻(住)”大三步走中第二步“用”的目标,将是我国后续月球探测任务水到渠成的可行选择。

参 考 文 献

- [1] 栾恩杰. 中国的探月工程——中国航天第三个里程碑[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 31-36. [Luan E J. China's lunar exploration program—the third milestone for China's space industry[J]. Engineering Sciences, 2006, 8(10): 31-36.]
- [2] 栾恩杰, 孙家栋. 首次月球探测工程中的系统工程理念[J]. 国防科技工业, 2008(1): 17-20. [Luan E J, Sun J D. System engineering ideas in the first Chinese Lunar Exploration Project [J]. Defence Science & Technology Industry, 2008(1): 17-20.]
- [3] 栾恩杰. 航天系统工程运行[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. [Luan E J. System engineering[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010.]
- [4] 嫦娥工程技术手册[R]. 北京: 国防科工委月球探测工程中心, 2007. [Chang'e project engineering technical manual[M]. Beijing: Lunar Exploration Program Center of COSTIND, 2007.]
- [5] 杨维廉, 周文艳. 嫦娥一号月球探测卫星轨道设计[J]. 航天器工程, 2007, 16(6): 16-24. [Yang W L, Zhou W Y. Orbit design for lunar exploration satellite CE-1[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(6): 16-24.]
- [6] 孟林智, 黄江川, 叶培建, 等. 嫦娥二号卫星多目标多任务设

- 计与经验[J]. 中国科学:技术科学, 2013, 43: 585 - 595. [Meng L Z, Huang J C, Ye P J, et al. Multi-objective and multi-mission design and experiences of Chang'e-2 Satellite [J]. Sci Sin Tech, 2013, 43: 585 - 595.]
- [7] 吴伟仁, 张荣桥, 郝希凡. 嫦娥二号工程技术手册[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. [Wu W R, Zhang R Q, Hao X F. Chang'e-2 engineering technical manual[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010.]
- [8] 周文艳, 杨维廉. 嫦娥二号卫星轨道设计[J]. 航天器工程, 2010, 19(5): 24 - 28. [Zhou W Y, Yang W L. Orbit design for Chang'e-2 lunar orbiter [J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(5): 24 - 28.]
- [9] 吴伟仁. 嫦娥二号工程技术总结[R]. 北京: 探月与航天工程中心, 2011. [Wu W R, Chang'e-2 engineering technical summary [R]. Beijing: Lunar Exploration and Space Engineering Center, 2011.]
- [10] 孙泽洲, 张廷新, 张焯, 等. 嫦娥三号探测器的技术设计与成就[J]. 中国科学:技术科学, 2014(44): 331 - 343. [Sun Z Z, Zhang T X, Zhang H, et al. The technical design and achievements of Chang'E-3 probe [J]. Sci Sin Tech, 2014 (44): 331 - 343.]
- [11] 吴伟仁, 裴照宇, 刘彤杰. 嫦娥三号工程技术手册[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.]
- [12] 吴伟仁, 裴照宇. 嫦娥三号工程技术总结[R]. 北京: 探月与航天工程中心, 2014. [Wu W R, Pei Z Y. Chang'e-3 engineering technical summary [R]. Beijing: Lunar Exploration and Space Engineering Center, 2014.]
- [13] 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[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45: 111 - 123. [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 [J]. Sci Sin Tech, 2015, 45: 111 - 123.]
- [14] 胡浩, 孙为钢, 钱卫平, 等. 月地高速再入返回工程技术总结[R]. 北京: 探月与航天工程中心, 2014. [Hu H, Sun W G, Qian W P, et al. Engineering technical summary of Moon-to-Earth high speed re-entry test [R]. Beijing: Lunar Exploration and Space Engineering Center, 2014.]
- [15] 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[J]. 中国科学:技术科学, 2014(44): 543 - 558. [Ye P J, Huang J C, Sun Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe [J]. Sci Sin Tech, 2014(44): 543 - 558.]

作者简介:

裴照宇(1966—), 男, 研究员, 探月二期工程副总师、三期工程副总师, 探月与航天工程中心副主任。主要研究方向: 航天任务总体设计、航天工程管理。

通信地址: 北京市西城区车公庄大街 12 号核建大厦 10 层 (100037)

电话: (010) 88306186

王琼(1983—), 男, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向: 月球与深空探测任务总体设计、星球巡视器任务规划、深空测控通信技术。本文通讯作者。

通信地址: 北京市西城区车公庄大街 12 号核建大厦 10 层 (100037)

电话: (010) 88306151

E-mail: wangq2006@163.com

Technology Roadmap for Chang'E Program

PEI Zhaoyu, WANG Qiong, TIAN Yaosi

(Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China)

Abstract: The moon is the nearest celestial body of the earth. Because of its unique spatial position and broad prospects of scientific exploration, it has become the preferred objective and consecutive option of human space exploration and resource utilization. In this paper, at first the development and accomplishments of the world's major space powers on lunar exploration are retrospected, and their future development plans are summarized. Then the development idea and technology roadmaps for the Chinese Lunar Exploration Program are introduced in details. Finally future development direction of Chinese lunar exploration is analyzed and a concept of robotic lunar science station mission before 2030 is proposed.

Key words: lunar exploration; technology roadmap; Chang'E program; robot; lunar science station

[责任编辑: 宋宏]