

## 深空探测技术 (特约)

邱家稳, 王 强\*, 马继楠

(北京飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘 要:** 深空探测是指对月球以及月球以远的天体或者空间环境开展的探测活动, 深空探测领域是我国实现航天强国战略的重要组成部分, 也是标志性领域之一。文中概要总结了深空探测 60 多年来的发展历程, 重点介绍了我国深空探测取得的成就和未来发展的趋势, 针对我国开展的探月工程和首次火星探测任务, 分析了各次任务已取得的技术突破, 围绕月球及深空探测后续任务规划, 对月球科研站建立、小行星探测、火星取样返回以及木星系探测等任务的关键技术进行了探讨。在此基础上归纳总结了我国深空探测技术的发展路线以及未来需重点研究和攻克的关键技术。

**关键词:** 深空探测; 发展趋势; 关键技术

中图分类号: V11 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201001

## Deep space exploration technology(*Invited*)

Qiu Jiawen, Wang Qiang\*, Ma Ji'nan

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Deep space exploration refers to the exploration of the moon and the celestial bodies or space environment beyond the moon. The field of deep space exploration is an important part in implement strategy of space power, and is also one of the signature field of the spaceflight. This paper summarizes the development of deep space explorations in the past 60 years, highlights the achievements and future development trends of deep space exploration in China. According to Chinese Lunar Exploration Program(CLEP) and the first Mars exploration missions, the key technical breakthrough in these task were analyzed. Breakthrough, focusing on the follow-up mission planning of lunar and deep space exploration, discussed the key technologies of missions such as the establishment of lunar research station, asteroid exploration, Mars sampling return and Jupiter system exploration. On this basis, it summarizes the development route of China's deep space exploration technology and the key technologies that need to be studied and overcome in the future.

**Key words:** deep space exploration; route of technology; key technology

收稿日期:2020-02-02; 修订日期:2020-03-02

作者简介:邱家稳(1962-),男,研究员,博士,主要从事深空探测、光学遥感技术等方面的研究。Email: 13911816829@139.com

通讯作者:王强(1982-),男,高级工程师,博士,主要从事航天器总体设计方面的研究。Email: teddywang\_0929@126.com

## 0 引言

人类的航天活动一般可分为人造卫星,载人航天和深空探测三大领域<sup>[1]</sup>,深空探测一般是指对月球以及月球以远的天体或者空间环境开展的探测活动,具有系统复杂、技术新、风险多的特点。深空探测是当今世界高科技活动中极具挑战性的领域之一,是世界航天领域最前沿的科技创新活动之一,是国家综合国力和创新能力的重要标志,对保障国家安全、提升国际影响力、促进科技进步以及提升国家软实力具有重要意义,深空探测可以增进人类对宇宙空间未知领域、太阳系和生命起源的认识,还可以推动空间科技的发展,促进空间资源的开发和利用。深空探测已成为世界各国未来航天领域发展的主要方向之一。

深空探测距离地球遥远并且所处空间环境复杂,任务过程中将面对陌生的未知环境,对探测技术提出了更高的要求。我国深空探测活动又分为月球探测和行星探测两部分,其中行星探测包含除月球外的太阳系内各类天体的探测以及行星际空间环境探测。我国深空探测活动起步于月球探测,起点高、发展迅速,“嫦娥四号”实现世界首次在月球背面软着陆,标志着我国深空探测领域已经跻身世界先进行列。深空探测技术的提升将使我国科技水平跨上一个新台阶,并为我国深空探测争做世界领先水平提供技术基础。

## 1 国外深空探测发展趋势

1958年,距首颗人造卫星进入太空后仅1年,人类就迫不及待地发射了第一个深空探测器-月球探测器“先驱者0号”,至2019年印度发射“月船2号”月球探测器为止,深空探测60余年的发展历程中,国外主要航天大国如美国、俄罗斯、欧洲以及日本等均不同程度开展了深空探测活动,相继实施深空探测任务246次,其中月球探测118次,如图1所示。其他深空探测128次,如图2所示,总成功率60%左右<sup>[2-3]</sup>。

美国最早开展深空探测活动,是目前唯一对太阳和太阳系八大行星开展过探测的国家,处于世界领先地位。俄罗斯/苏联早期创造了多项“第一”,受政治环境影响,其发展一度停滞,近年逐步恢复。欧空局(ESA)起步相对晚,发射次数虽少,但成功概率高,在较短的时间内达到了很高的水平,发展势头强劲。日本在小

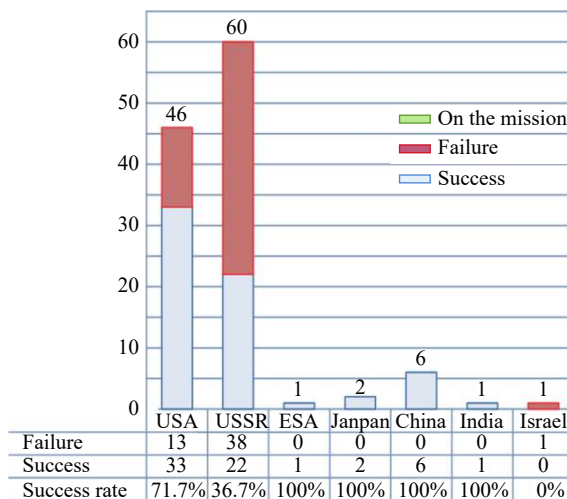


图1 月球探测统计

Fig.1 Lunar exploration statistics

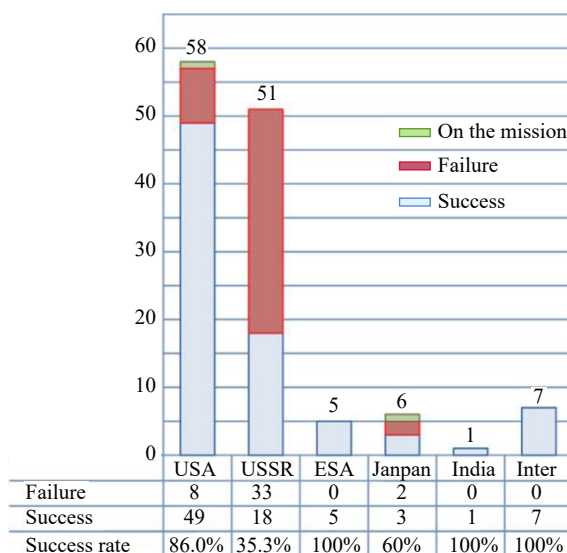


图2 其他深空探测统计(无月球探测)

Fig.2 Statistics of deep space exploration(without lunar exploration)

行星探测方面取得了很大的成功,走出了一条独具特色的发展之路。印度于2013年成功实现了亚洲首次火星探测。进入21世纪,各航天大国及组织均制定了深空探测规划,无一例外地将深空探测的发展作为带动国内航天技术发展的重要牵引。同时,寻找“太阳系的奥秘、行星的起源、生命的存在”始终是各国航天组织不断开展的深空探测活动中的重要追寻目标。

从任务发展角度来说,未来的深空探测任务仍遵循由近及远、由易到难的发展规律,月球探测逐步从能力建设向资源开发利用方向发展;火星探测仍为深空探测重点;小行星探测成为深空探测新的热点;木

星系及以远行星际探测成为展现航天到达能力的, 牵引技术跨越发展的亮点。

从技术发展角度来说, 深空探测任务的主要难点基本都是由距离遥远和环境恶劣带来的, 未来深空探测任务将探索更加遥远的宇宙空间, 任务难度将不断加大, 需要不断地进行技术创新与验证。未来, 对深空及其中的天体探测的深度与广度直接取决于一系列关键技术突破与支撑的程度。其中, 深空轨道设计与优化、自主技术、能源与推进、深空测控通信、新型结构与机构、新型科学载荷技术等是急需突破和掌握的关键技术。

## 2 我国深空探测成就及技术发展

我国已立项深空探测任务包括月球探测的探月

工程一、二、三期任务以及首次火星探测任务。目前已成功实施了“嫦娥一号”、“嫦娥二号”、“嫦娥三号”、“嫦娥五号”再入返回试验以及“嫦娥四号”五次任务, 掌握了环月探测、月面软着陆以及月地再入返回等关键技术, 具备了发射、测控、通信以及回收等航天基础设施与能力, 建立了较为完善的工程体系, 获得了大量科学成果。正在实施的探月三期“嫦娥五号”-“月球采样返回”任务以及首次火星探测任务, 将于 2020 年前完成工程预定目标。

### 2.1 我国月球探测取得的成就

我国探月工程“五战五捷”, 如图 3 所示。总的来说: “起步晚、起点高”, “任务次数少、涵盖内容多”, “投入少、产出多”, 已迅速跻身于国际月球探测先进行列。



图 3 我国探月工程

Fig.3 Chinese lunar exploration program

#### 2.1.1 “嫦娥一号”探测器<sup>[4]</sup>

考虑到是我国首次月球探测任务, “嫦娥一号”探测器的设计遵循“快速”、“经济”、“可靠”的原则, 选择成熟的东方红 3 号公用卫星平台, 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。2007 年 10 月 24 日, “嫦娥一号”探测器成功发射, 实现了继人造地球卫星、载人航天之后我国航天活动的第三个里程碑, 初步构建了完整的工程体系, 使我国跨入了世界上为数不多的具有深空探测能力的国家行列, 这是我国综合国力显著增强、自主创新能力和科技水平不断提高的重要体现。“嫦娥一号”探测器取得的重大技术创新主要包括: (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; (9) 数据接收与研究技术, 如图 4 所示。

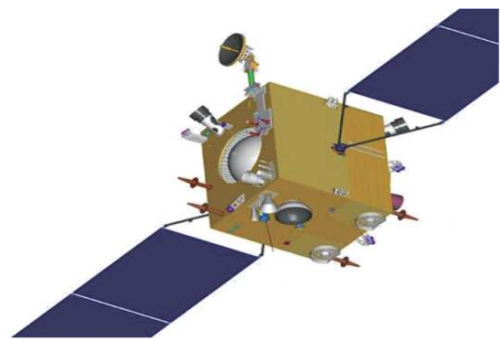


图 4 “嫦娥一号”探测器

Fig.4 “Chang'e-1” probe system

#### 2.1.2 “嫦娥二号”探测器<sup>[5]</sup>

为了验证直接月转移轨道等关键技术, 同时对“嫦娥三号”任务预选着陆区进行高分辨率成像试验, 定量评估预选着陆区的地表特性, 提高“嫦娥三号”任务着陆安全性, 我国开展了“嫦娥二号”探测器的研制工作。2010 年 10 月 1 日, “嫦娥二号”探测器成功发

射,如图 5 所示。2010 年 10 月 6 日,卫星准确进入了环月轨道。“嫦娥二号”工程的成功实施,突破了一批核心和关键技术,取得了一系列重大科技创新成果,主要包括:(1)突破直接地月转移轨道发射和飞行技术;(2)首次成功实现 100 km×100 km 和 100 km×15 km 环月飞行;(3)突破近月点 15 km 轨道短弧段、快速测定轨关键技术,建立具有自主知识产权的月球重力场模型;(4)国际上首次获得 7 m 分辨率全月球立体影

像,并获得优于 1.5 m 的预选着陆区高分辨率立体影像;(5)首次验证 X 频段深空测控体制和相关技术;(6)首次实现地月空间飞行过程监视成像和低密度奇偶校验码(LDPC)遥测信道编译码。在完成了所有规定任务后,“嫦娥二号”探测器开展了拓展实验,并在国际上首次实现从月球轨道飞向日地拉格朗日 L2 点的拓展试验。

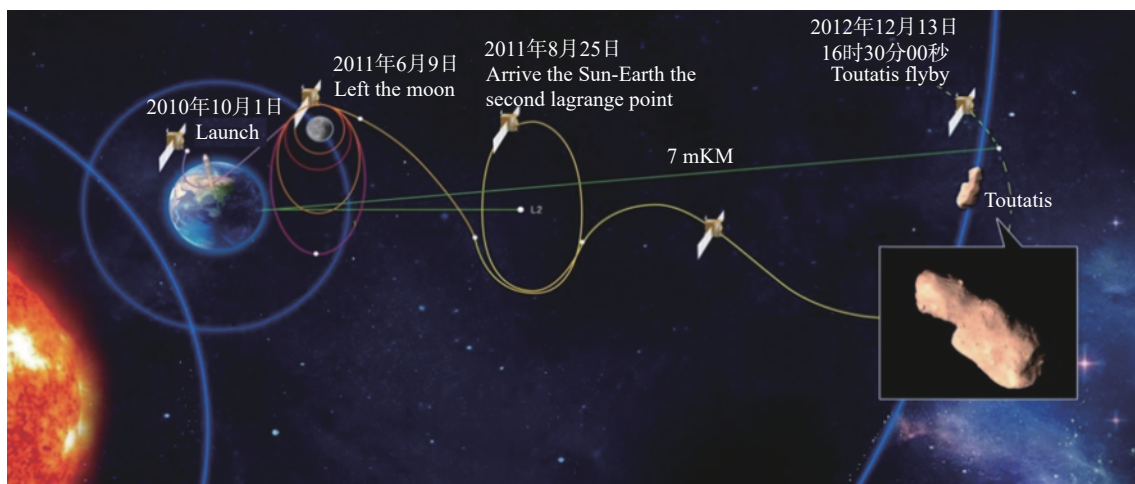


图 5 “嫦娥二号”探测器飞行过程

Fig.5 Flight course of "Chang'e-2" probe

### 2.1.3 “嫦娥三号”探测器<sup>[6]</sup>

“嫦娥三号”探测器由月球软着陆探测器(简称着陆器)和月面巡视探测器(简称巡视器,又称玉兔号月球车)组成(图 6),2013 年 12 月 2 日在中国西昌卫星发射中心由“长征三号”乙运载火箭送入太空,当月 14 日成功软着陆于月球雨海西北部虹湾地区。“嫦娥三号”探测器是中国第一个月球软着陆无人探测器,

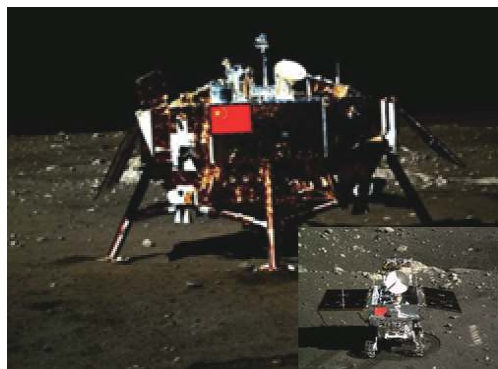


图 6 “嫦娥三号”探测器

Fig.6 "Chang'e-3" probe system

其拍摄的月面照片是人类时隔 40 多年后首获最清晰月面照片。“嫦娥三号”获取的月面地形地貌、月壤成分、浅层月壤分层结构、紫外对地观测、月基光学观测数据已向全球免费开放共享,取得了丰硕的成果。同时,在航天器总体设计、制导导航和控制系统设计、推进系统设计、热控系统等方面取得一系列自主创新的科研成果,包括:(1)实现了多学科总体优化设计;(2)突破了软着陆的自主制导、导航和控制技术;(3)突破了复杂推进系统设计和变推力发动机技术;(4)突破了软着陆的着陆缓冲技术;(5)突破了月面移动技术;(6)突破了月面生存技术;(7)突破了自主导航与遥操作控制技术;(8)实现了月面就位和巡视科学探测;(9)突破了软着陆和巡视探测的地面试验技术。

### 2.1.4 “探月三期月地高速再入返回飞行试验”任务

为确保“嫦娥五号”奔月、月球采样、返回地球任务的顺利完成,2014 年 10 月 24 日发射了由返回器和服务舱两部分组成的嫦娥五号“探路者”-探月三期月

地高速再入返回飞行器。2014 年 11 月 1 日,服务舱与返回器分离,返回器顺利着陆,试验任务取得圆满成功(图 7)。探月三期月地高速再入返回飞行试验任务的实施,全面提升了我国对高速条件下高空稀薄大气的气动力、气动热、热防护、制导导航与控制等技术机理的认识水平,提高了高空稀薄大气条件下高速再入过程数学和物理模型的精度,积累了高空大气中高速飞行的工程经验,带动了新材料的研制和航天装备设计方法的创新。主要技术成果包括:(1)构建了双平台飞行器系统,实现了一次任务多目标的设计方案;(2)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返回;(3)突破了再入返回气动设计、分析和验证,实现了我国高空高速空气动力学的跨越;(4)突破了高速两次再入大气层热防护技术,研制了轻质防热系统;(5)突破了半弹道跳跃式高速再入返回自主制导导航与控制技术,实现了国际上最高精度深空再入返回;(6)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。



图 7 “嫦娥五号”高速再入返回器返回着陆

Fig.7 Sample return capsule of "Chang'e-5" flight test

### 2.1.5 “嫦娥四号”任务<sup>[7]</sup>

“嫦娥四号”任务包括“鹊桥”以及“嫦娥四号”月球探测器两部分。“鹊桥”中继卫星于 2018 年 5 月 21 日 5 点 28 分,中国在西昌卫星发射中心由“长征四号”丙运载火箭成功发射升空。6 月 14 日进入环绕距月球约 6.5 万 km 的地月拉格朗日 L2 点的 Halo 使命轨道。“鹊桥”中继卫星是世界首颗运行于地月拉格朗日 L2 点的通信卫星,能够实时的把在月球背面着

陆的“嫦娥四号”探测器发出的科学数据第一时间传回地球,具有重大的科学与工程意义,也是人类探索宇宙的又一有力尝试。

“嫦娥四号”月球探测器由着陆器与巡视器组成,巡视器命名为“玉兔二号”。2018 年 12 月 8 日,在西昌卫星发射中心由“长征三号”乙改二型运载火箭成功发射“嫦娥四号”月球探测器,开启了月球探测的新旅程。2019 年 1 月 3 日,“嫦娥四号”探测器成功着陆在月球背面南极-艾特肯盆地冯·卡门撞击坑的预选着陆区。

“嫦娥四号”月球探测器是国际首个在月球背面着陆的探测器(图 8),在航天器总体设计、中继通信系统设计、制导导航和控制系统设计等方面取得了一系列自主创新的科研成果。主要包括:(1)突破了地月 L2 点中继轨道设计技术;(2)突破了月背崎岖地形软着陆自主控制技术;(3)突破了地月中继通信技术;(4)突破了月夜采温系统技术;(5)突破了巡视器高可靠安全移动与机构控制技术;(6)突破了月背复杂环境巡视器昼夜周期规划技术;(7)突破了“嫦娥四号”长期贮存可靠性评价与验证技术;(8)固网结合的高增益可展开天线首次在轨应用;(9)采用单组元推进系统实现了大速度增量轨道控制;(10)实现了中继通信天线指向的高精度指向控制和在轨标定;(11)突破了再生伪码测距技术。

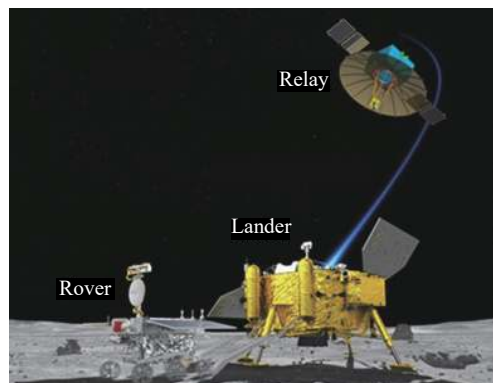


图 8 “嫦娥四号”探测器系统

Fig.8 "Chang'e-4" probe system

### 2.1.6 “嫦娥五号”任务

“嫦娥五号”探测器,是由中国空间技术研究院研制的中国首个实施无人月面采样返回的航天器。计划在探月工程三期中完成月面采样返回任务,是该工程中最关键的探测器,也是中国探月工程的收官之战。

“嫦娥五号”探测器全重 8.2 吨,由轨道器、返回器、着陆器、上升器四个部分组成,将由我国目前推力最大的“长征五号”运载火箭从中国文昌航天发射场进行发射,如图 9 所示。

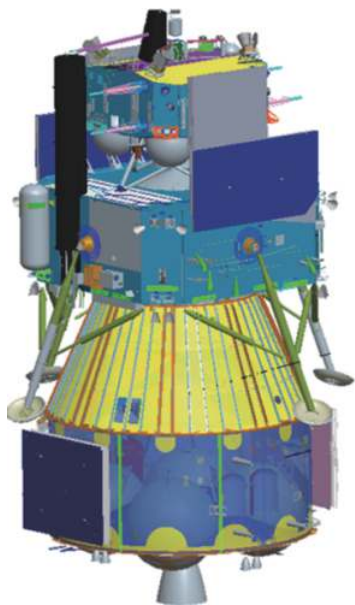


图 9 “嫦娥五号”探测器系统  
Fig.9 "Chang'e-5" probe system

通过“嫦娥五号”的研制和实施,中国将突破月表自动采样、样品的封装与保存、月面动力上升、采样返回轨道设计、地球大气高速再入、月球轨道交会对接、多目标高精度测控通信、月球样品储存和地面实验室分析等关键技术,提升航天技术水平;具备月球无人采样返回的能力,首次实现中国月面自动采样返回,实现航天技术的重大跨越;完善中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,为后续载人登月和深空探测工程服务。

### 2.2 首次火星探测任务

火星首次探测任务目前正在工程研制阶段<sup>[8]</sup>。探测器系统由环绕器和着陆巡视器组成(图 10),计划 2020 年前实施发射,2021 年环绕、着陆火星。任务难点集中在以下四个方面:

#### (1) 任务起点高,技术跨度大

首次火星探测任务将通过一次任务,实现“绕着巡”,着陆有效质量仅次于好奇号,环火探测能力与国际相当,而国际火星任务成功率仅 52%,多目标耦合设计增大了任务固有风险;

#### (2) 任务环境新,不确定性大

火星表面着陆巡视将面临诸多新环境,而我国并不掌握火星准确的一手数据,不确定度大;

#### (3) 关键环节多,攻关难度大

火星表面存在稀薄大气,不同于月球着陆,火星进入/下降/着陆(EDL)等关键环节多,相对应的全新气动外形、新型盘缝带伞、新式主动悬架、行星际测控等关键技术攻关难度大;

#### (4) 研制周期短,试验难度大

为了验证关键环节,火星工程研制过程设计了多组专项试验项目,试验规模大,数量多,试验周期长,研制周期短。并且,由于火星环境模拟困难,试验难度大,存在部分火星环境不能综合模拟问题。

为解决上述难题,顺利实施首次火星探测任务,将突破火星制动捕获、火星进入着陆、火星表面巡视、长期自主管理、行星际测控通信等关键技术,使我国深空探测技术能力和水平进入世界航天第一梯队,实现深空探测技术的跨越。

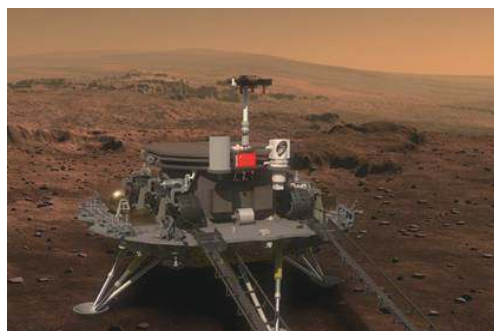


图 10 首次火星探测器系统着陆巡视器  
Fig.10 The first Mars Rover system landing patrol

## 3 我国月球与行星探测任务及技术发展

在前期探月工程的基础上,我国开展了探月工程四期任务论证工作,计划对月球南极进行综合探测,并建立无人科研站基本型。同时,除了已经开展工程研制的首次火星探测任务外,我国将全面推进行星探测后续任务论证工作。月球和行星探测后续任务的实施将使我国初步具备月球资源利用能力以及全太阳系到达能力。

### 3.1 我国月球探测未来任务设想

月球是距离地球最近的天体,其探测已经逐步由能力建设转向资源利用,独特的空间资源、原位非生物资源以及广阔的科学探测前景使月球成为人类地

外天体探测和资源利用的首选目标。我国在已有探月工程的基础上,开展了探月工程四期项目的论证工作,通过多种探测手段、多次任务,在科学上,开展月球南极地区地质特征和演化历史研究,月面环境综合效应研究,以水冰为代表的月球资源详查,进行月基天文观测与对地监测;在工程上,突破全月面到达、高数据率地月通信、大区域智能机器人、全周期能源供给、先进探测载荷等关键技术,形成全周期、复杂环境条件下的机器人月球探测能力,开展资源利用技术验证。为未来载人登月和月球科学考察站建设起到承前启后、技术探索与验证的重要作用。探月工程四期项目共论证了四次任务,其中“嫦娥四号”任务作为先导任务已经取得成功,后续还将陆续开展“嫦娥七号”、“嫦娥六号”、“嫦娥八号”探测任务,在 2030 年前构建我国月球无人科研站的基本型(图 11)。

“嫦娥七号”任务将设计复杂的探测器系统,包括轨道器、中继星、着陆器、勘察巡视器和飞跃探测器,对月球南极的绕、落、巡、飞跃、中继“五位一体”综合探测,突破阴影坑飞跃探测等关键技术,建立极区对地中继通信链路,实现极区环境与资源详查,为极区采样返回和科研站基本型建设奠定基础。其中将对月球南极永久阴影坑首次采用飞跃探测的探测方

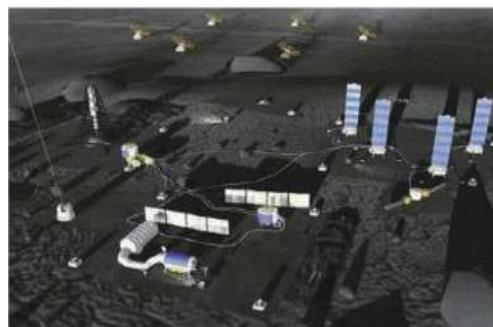


图 11 未来我国月球无人科研站基本型

Fig.11 Basic type of China's unmanned scientific research station on the Moon in the future

式,开展短暂的就位探测。

“嫦娥六号”任务将在“嫦娥五号”探测器的基础上,进行适应性的改造,实施月球南极着陆并采样返回,获取南极区域月球样品。

“嫦娥八号”任务将重点突破大承载着陆关键技术,将包含着陆器,飞跃探测器、月面智能机器人在内的多类送至月球南极附近,并与“嫦娥七号”任务的着陆器、中继星一起组成月面协同工作群,完成月球科研站基本型建设。

如图 12 所示,探月工程四期任务将充分利用前期探月任务的技术基础,通过三次任务逐步突破月球

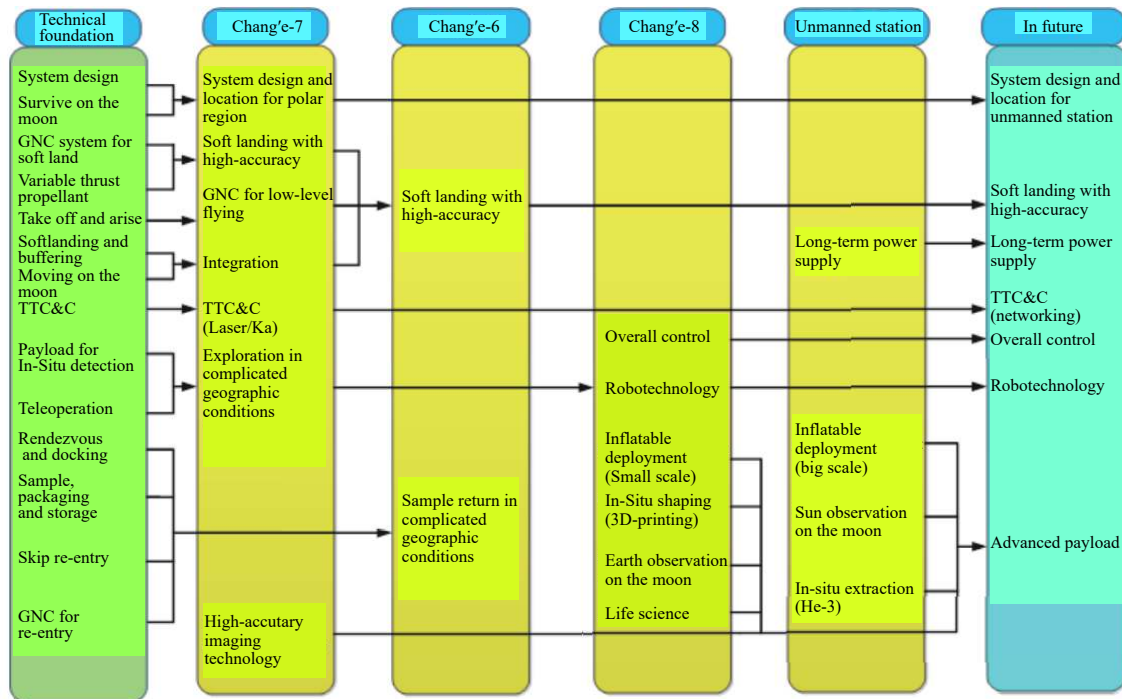


图 12 我国月球探测技术发展路线

Fig.12 Technology roadmap for lunar exploration of China

探测关键技术,实现月球全面到达能力的建设,并为后续资源开发利用奠定基础。

### 3.2 我国行星探测未来任务设想

我国行星探测工程围绕太阳系起源与演化、小天体和太阳活动对地球的影响、地外生命信息探索等空间科学重大问题,在 2030 年前安排了 4 次探测任务。以火星探测为重点和主线,按照“一步实现绕着巡、二步完成取样回”的发展路线,在 2020 年实施首次火星探测任务,2030 年前后实现火星取样返回探测任务。另外将开展一小一大两类太阳系天体原位探测,2024 年前后实现小行星探测,2030 年前后实施木星系及行星际探测,这两次任务均是一次任务实现多个目标,体现了我国深空探测多目标、高科学产出的特点。

#### 3.2.1 小行星探测任务

小行星探测任务将通过一次任务实现近地小行星 2016HO3 的采样返回以及主带彗星 133P 的环绕探测。小行星探测任务充分体现了我国深空探测一次任务实现多目标多任务的特点。探测器系统包括主探测器及返回舱,探测器将首先完成近地小行星的绕飞探测,获得目标小行星的物理化学参数,并对目标小行星进行建模,从科学研究重要性和工程实施可行性两方面选定备选区,经过多次演练后在选定的备选着陆附着并采样,采样后探测器系统返回地球。进入地球大气之前,主探测器与返回舱分离,返回舱采用弹道式再入方式进入地球大气层并安全着陆在预定着陆场,主探测器分离后实施拉起机动,通过一次地球借力和一次火星借力后飞向主带彗星,开展主带彗星绕飞探测。

如图 13 所示,小行星探测器系统包括主探测器及返回舱,探测器将首先完成地球准卫星的绕飞探测,选定备选着陆区后进行附着和采样,完成后返回地球。返回舱采用弹道式载入,高速进入地球大气层并在预定着陆场着陆,主探测器在地球借力后飞向主



图 13 小行星探测器系统  
Fig.13 Asteroid probe system

带彗星,开展主带彗星绕飞探测。我国小行星探测任务采用了稳定附着之后进行采样的方式,不同于国外的隼鸟号、欧西里斯号等小行星采样返回任务普遍采用的“一触即走”(Touch and Go, TAG)方式,稳定附着后采样能够实现更大容量的样品采集,并且能对不同类型样品进行分别封装。探测任务的科学成果将为揭示宇宙起源与演化、小行星物质构成与演化、生命起源等重大科学热点问题做出贡献,并且对小行星资源利用,有撞击地球威胁小行星的预警等方面提供直接探测数据支持。同时,通过小行星探测任务,预期将突破微重力环境下的附着、固定技术;轻巧型超高速再入技术;连续小推理轨道控制技术等一批关键技术,为后续火星取样返回和木星探测积累技术基础。

#### 3.2.2 火星取样返回任务

在首次火星探测任务技术基础上,计划 2030 年前后发射火星取样返回探测器,实现火星表面固态样品的多点无人智能采样,并将样品安全返回地球,开展实验室精细研究(图 14)。



图 14 火星取样返回任务示意图

Fig.14 Schematic diagram of Mars sample return mission

火星取样返回任务探测器系统包括四个探测器,分别为轨道器、着陆器、上升器以及返回器,采用两次发射的方式,分别将轨道器和返回器的组合体以及着陆器和上升器的组合体送入地火转移轨道。其中,着上组合体将直接实现火星大气的进入、下降和着陆,采集样品装入上升器后,完成火星表面的起飞上升并将样品送入环火轨道;轨返组合体将进入环绕火星轨道,等待上升器将样品送入轨道,主动完成对上升器的搜寻和交回,并将样品转移至返回器,最后携带返回器重返地球,返回器实现样品的安全返回。任



务的主要难点在于火星环境更加恶劣,并且距离地球更加遥远。一方面,相比于月球,火星重力更大,并且表面有稀薄大气,对上升器的性能要求更加强,而受限于着陆规模限制,上升器的设计难度大。另一方面,火星与地球单程通信延时大于 20 min,对着陆过程、上升过程、上升器与轨道器在轨交汇过程等需要快速响应的动态过程自主性需求强烈。通过任务的实施,预期将突破火星表面起飞上升技术、火星表面智能采样、封装和传递技术、环火轨道样品捕获和转移技术、火星大气辅助变轨技术、环火轨道交会技术和火星采样返回微生物污染检测与防护技术等关键技术。

### 3.2.3 木星系与行星际穿越探测任务

木星系及行星际穿越探测将通过一次任务,实现对木星及其卫星的环绕探测以及行星际空间穿越探测,深化木星系研究以及行星际空间环境研究,并在 2050 年前后到达天王星,展示我国深空到达能力(图 15)。探测器系统由木星系探测器和行星际穿越器组成,计划 2030 年前后发射,探测器系统由运载火箭一次送入地木转移轨道,到达木星前两器分离,木星系探测器减速制动后进入木星环绕轨道,开展木星及其卫星探测,行星际穿越器经过一次木星借力后飞向天王星。

木星探测的突出特点在于距离地球遥远,探测器在轨道转移过程中经历了极高温和极低温环境的转



图 15 木星系及行星际穿越探测任务示意图

Fig.15 Schematic diagram of Jupiter and interplanetary crossing exploration mission

换,并且木星探测器还要受到木星系强电磁环境的考验。所以探测器对自主能力的需求和对环境适应性的需求与之前任务相比有跨越性提升。实施木星系及行星际穿越任务预期在探测器自主导航与控制、自主管理、环境适应性等多个技术领域取得突破。

### 3.2.4 技术发展路线

依托四次任务,行星探测技术发展路线见图 16。我国将逐步突破和提升深空探测自主导航、自主管理、深空测控通信,以及载荷设计等共性关键技术和能力。针对任务的不同特点,开展多种取样方式、附

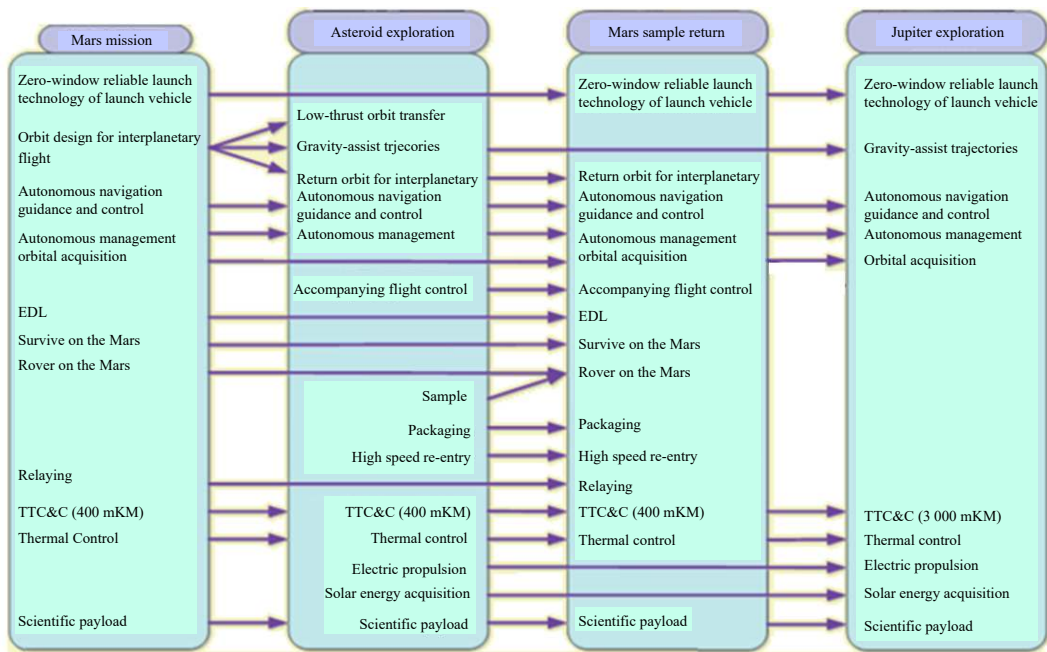


图 16 中国深空探测技术发展路线

Fig.16 Technology roadmap for deep space exploration of China

着控制、起飞上升等多项特色化技术的论证。

#### 4 结束语

深空探测是人类探索宇宙奥秘、保护和建设美好地球家园的必然选择,也是一项高技术、高风险、高投入的航天活动。经过 60 多年的探索与发展,人类已对太阳系主要天体,尤其是月球和火星进行了比较深入的探测,取得了一系列巨大的工程技术成果。

我国已成功实施了“嫦娥一号”、“嫦娥二号”、“嫦娥三号”、“嫦娥五号”再入返回试验以及“嫦娥四号”共五次任务。这些任务的圆满实现,标志我国已掌握了月球探测的多项关键技术,获得了大量科学成果,建立了较为完善的工程体系,具备了月球全面探测和开展更远距离深空探测的基础,应抓住新一轮探测高潮的难得机遇,尽快制定发展规划,着力突破关键技术,早日后续深空探测任务,为人类文明进步做出更大贡献。

#### 参考文献:

- [1] Ye P, Jing P. Retrospect to human deep space exploration history, and its prospect in China [J]. *Engineering Sciences*, 2006(4): 1-7.
- [2] Zheng Y, Ouyang Z, Li C, et al. China's lunar exploration program: Present and future [J]. *Planetary and Space Science*, 2008, 56(7): 881-886.
- [3] Gonzalo Munévar. Science and Ethics in the Exploration of Mars[M]. Berlin:Springer Press, 2019: 185-200.
- [4] Ye Peijian. China's first lunar exploration satellite—Chang'e-1 [J]. *Aerospace China*, 2007(4): 3-7. (in Chinese)
- [5] Huang Jiangchuan, Ji Jianghui, Ye Peijian. The ginger-shaped asteroid 4179 toutatis: New observations from a successful flyby of Chang'e-2 [J]. *Scientific Reports*, 2013, 12(3): 03411.
- [6] Sun Zezhou, Zhang He, Jia Yang, et al. Technological advancements and promotion roles of Chang'e-3 lunar probe mission [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(11): 2702-2708.
- [7] Ye Peijian, Sun Zezhou, Zhang He. An overview of the mission and technical characteristics of Change'4 lunar probe [J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(5): 658-667.
- [8] Ye Peijian, Sun Zezhou, Rao We. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China [J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(5): 5-13.