

深空探测与我国深空探测展望

叶培建, 彭 兢

(中国空间技术研究院, 北京 100081)

[摘要] 对人类已经开展的深空探测活动进行了回顾, 简介了近期已开展和未来5年内将要开展的深空探测任务, 以及未来主要航天国家的深空探测规划, 提出了未来我国开展深空探测应掌握和突破的关键技术; 介绍了我国深空探测的现状, 对绕月探测工程和嫦娥1号进行了简介, 重点介绍了探月工程二、三期的思路和二期工程的立项论证情况和初步总体方案, 同时简要叙述了正在论证中的中俄联合火星探测、夸父计划、硬X射线天文望远镜和空间太阳望远镜等项目的概况; 给出了对我国未来深空探测发展方向的思考和展望。

[关键词] 深空探测; 行星际探测; 多目标多任务; 中国探月工程

[中图分类号] V475; V529 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)10-0013-06

1 深空探测的目的和意义

深空探测是相对于近地轨道航天器而言的。根据2000年发布的《中国的航天》^[1]白皮书中的定义, 国内目前将对地球以外天体开展的空间探测活动称为深空探测。这个定义也不是一成不变的, 随着人类航天科技水平和能力的提高, 深空和深空探测的概念也会逐渐发展。

人类的航天活动一般可分为地球应用卫星、载人航天和深空探测三大领域。我国在前两个领域已经取得令人瞩目的成就。在此基础上开展深空探测活动, 是航天技术发展的必然选择, 也是人类进一步了解宇宙、认识太阳系、探索地球与生命的起源和演化、获取更多科学认识的必须手段。

开展深空探测对于科技进步和人类文明的发展具有显著的作用和意义, 具体表现为: 提高国家综合国力, 振奋民族自尊心, 增强民族凝聚力; 深空探测是人类走出地球, 进入深空的重要手段, 有利于开发和利用空间资源, 服务于人类社会的可持续发展; 深空探测能够促进行星科学、地球与行星科

学、太阳系演化、空间天文学、空间物理学、空间材料科学、空间环境科学与微重力科学等基础学科的交叉渗透与创新; 深空探测将直接促进航天整体技术水平的提升, 同时还将带动电子、信息、材料、能源等科学技术的发展; 深空探测能够推动科技教育的发展, 激励更多的青少年投身科学事业, 提高全民族的科学素质和自主创新意识; 开展深空探测有利于促进航天活动的国际合作, 在国际舞台上充分展示国家实力。

2 深空探测的发展历程

随着人类社会的发展, 人类寻找地外能源、拓展生存空间的需求也变得越来越迫切。早在上个世纪50年代末, 苏美已开始实施深空探测任务; 进入21世纪以来, 各主要航天大国纷纷制定了宏伟的未来深空探测规划, 将深空探测作为重点发展的航天领域之一。

从1958年8月17日美国发射第一个月球探测器先驱者0号开始, 人类迈向太阳系的深空探测活动至今已有近50年的历史了。据统计, 截止到

[收稿日期] 2006-08-28

[作者简介] 叶培建(1945-), 男, 江苏泰兴县人, 中国科学院院士, 中国空间技术研究院深空探测领域首席专家; 彭兢(1972-), 男, 新疆乌鲁木齐市人, 中国空间技术研究院高级工程师, 从事航天器轨道和总体设计工作

2006年6月,人类已发射过的向月球以远的太阳系天体开展的深空探测活动共215次,其中成功和部分成功的114次,占总次数的53.0%,仅稍多于一半,这里所说的成功或部分成功的判定依据主要以是否返回探测数据为准;还有3次任务正在飞行途中^[2-4]。

以上统计的深空探测器都是月球以远(包括月球)的天体为探测目标,飞行距离大于等于地月距离,主引力场不是地球的空间探测任务;不包括与这些任务相关的运载试验和地球轨道试验任务,并且同一次任务中携带多个探测器也只计算一次。

在迄今为止所有的深空探测任务中,俄罗斯(苏联)发射过113次,占总数量的52.6%;美国发射过87次,占总数量的40.5%;日本发射过5次,占总数量的2.3%;欧空局发射过5次,占总数量的2.3%;美国和欧洲(包括欧洲国家)合作发射过5次,占总数量的2.3%。

在以上深空探测任务中,以探测月球为主任务的次数最多,达108次,占总数量的50.2%;探测太阳的11次(不包括近地轨道的太阳探测任务),占任务总次数的5.1%;探测火星的37次,占17.3%,其中1990年以后发射的有12次,尤其是1996年以后,在每两年一次较为有利的发射窗口期间,都有火星探测器发射;探测金星的40次,占18.7%,其中1990年前发射的39次,过去的金星探测器大多数是苏联发射的,总数为33次;探测水星的2次,占0.9%;探测木星、土星等气体巨星及其卫星的6次,占2.8%;探测冥王星的1次,占0.5%;探测彗星和小行星等小天体的10次,占4.7%。

在人类已经开展的深空探测任务中,很多探测器在任务期间对多个目标进行了不同形式的探测,以上的统计仅以探测任务的主目标或预先设定的目标作为依据,没有进行重复计算。

已开展的深空探测任务中常采用多目标多任务的探测方式。这类任务形式主要有3类:使用1个飞行器对多个探测目标进行探测;探测任务目标中科学探测和新技术试验验证相结合;通过复合飞行器(2个以上飞行器的复合体)分别对不同目标或不同任务实施探测。

符合上述3种形式并且已经取得成功的深空探测任务共计67次,占任务总数的31.2%,接近1/3。因此,多目标多任务探测在深空探测领域是一

种非常重要的探测形式。

3 国外深空探测的新动态

3.1 近期的任务

国外2000年后发射的任务包括:

月球 Smart-1 (2003);

火星 火星奥德赛(2001),火星快车(2003),勇气号和机遇号(2003),火星侦察轨道器(2005);

大行星 信使(2004),金星快车(2005),新地平线(2006);

小天体 隼鸟(2003),罗塞塔(2004),深空撞击(2005);

太阳 起源号(2001)。

未来5年内将要发射的深空探测计划包括:

Selene 日本,2007年发射,月球环绕探测;

New Dawn 美国,2007年6月发射,小行星探测;

Phoenix 美国,2007年8月发射,火星软着陆探测;

LRO 美国,2008年10月发射,月球环绕探测和撞击;

Chandrayaan-1 印度,2008年发射,月球环绕探测;

火星科学实验室 美国,2009年发射,软着陆探测;

Lunar A 日本,2010年前(待定)发射,月球撞击;

Juno 美国,2010年发射,木星环绕探测。

3.2 未来的最新规划

进入21世纪后,特别是2004年后,世界各主要航天大国纷纷提出明确的深空探测规划或任务计划,比较有代表性的有:

美国 2004年提出“新太空计划”,将通过一系列的工程和探测任务实现2018年重返月球,并在2025年将人类送上火星,同时开展一系列无人星际探测任务;

欧洲 2004年提出“曙光女神计划”,被称为“欧洲的阿波罗计划”,初步规划2024年前后载人登月,2033年实现载人登陆火星,同时开展其他无人星际探测任务;

日本 2005年出台规划,近期将发射多个无人月球探测器和小行星探测器,并提出月球基地建设

设的设想;

印度 2008 年发射第一颗月球环绕探测卫星;

俄罗斯 2010 年前后发射火星探测器, 2015 年前后发射月球撞击器和金星探测器。

4 国外深空探测发展历程的启示

总结过去国外已经开展的深空探测任务, 参考未来一段时期内各主要航天国家的发展规划和设想, 可以得到如下启示:

1) 探索太阳系乃至整个宇宙的起源、发展和演化是深空探测任务的总科学目标, 具体可包括太阳系内各天体的起源、发展和演化, 地球以外生命(和水)的存在, 空间资源的开发利用;

2) 深空探测活动与科技进步的互动效应极大地推动了人类科技水平的持续发展;

3) 以 Apollo 计划为代表的大型综合深空探测活动对整个人类社会的影响极为深远;

4) 世界各主要航天国家通过深空探测凝聚了国家和民族意志, 增强了民族自豪感, 激发了探索精神, 促进了新一代科研工作者的成长。

4.1 国外深空探测对象选择的特点

最初开展深空探测的主要对象一般由近及远;

月球是起点和前哨站;

火星是月球之后的又一个探测热点;

小天体探测日益受到重视;

多目标多任务探测是深空探测的一种重要形式;

对太阳系中心天体太阳的探测活动一直未曾间断过;

火星和金星之外的大行星及其卫星探测活动任重道远。

4.2 国外深空探测任务探测方式的特点

一般包括飞越、硬着陆(撞击)、环绕、软着陆(+巡视)、无人采样返回、载人探测等形式。

近年来出现的两个新趋势: 对同一探测对象采取多种探测形式交替进行的方式, 在一次任务中多种探测手段组合实现综合探测。

独立的小型深空探测任务广泛采用多目标多任务探测方式。

科学探索和技术验证相辅相成。

载人深空探测是未来的制高点和必然选择。

4.3 深空探测任务面临的新问题

如何客观对待固有的高风险性, 如何统筹安排

技术验证与科学探测;

由于任务成功判据呈现多样性, 应建立深空探测任务的相应评价体系;

与近地航天任务相比, 深空探测任务时间跨度较大, 深空探测工程系统的研制过程和任务的运行管理体系应进行相应的改变;

较长的任务周期对参与研制过程的技术人员心理产生影响, 同时公众和社会的关注程度和对任务效果的认同随时间不断发展变化。

4.4 开展深空探测必须解决的主要关键技术

为了进入遥远的深空, 对太阳系内的天体开展探测活动, 必须掌握如下的主要关键技术:

行星际飞行技术 包括行星际轨道优化设计技术和行星际飞行的推进技术;

深空自主导航与控制技术 高精度的导航与控制敏感器, 自主导航与控制算法, 自主星务管理技术, 在轨自主故障诊断和应对技术等;

深空测控通信技术 新型的测控体制, 星上的定向天线, 小型高灵敏度深空应答机、高效大功率放大器等技术等, 地面大口径天线和天线组阵技术, 频段规划与选择, 低温制冷超低噪声温度放大器, 高精度时标和频标, 光通信技术等;

其他关键技术 深空探测目标众多, 探测形式多样, 除了以上三项主要的关键技术, 具体的任务还应根据探测目标和探测手段的不同需要掌握不同天体表面的巡视移动技术, 不同天体表面的软着陆技术, 先进结构与机构技术, 长寿命、高可靠性技术, 综合电子技术, 先进能源与热控技术等。

5 我国的深空探测现状

经过 40 多年的发展, 我国已成功研制并发射了 60 多颗人造卫星、4 艘试验飞船和 2 艘载人飞船, 另外还发射了 30 余颗外国卫星, 取得了一系列重大成就, 建立了完整配套的航天工程体系, 达到了相当的规模和水平, 积累了丰富的实践经验, 并且在空间科学和航天技术领域培养造就了一支高素质的科技队伍, 这些基础设施和人才资源为我国开展深空探测奠定了坚实的技术和物质基础。

本世纪初, 世界各主要航天大国都重新燃起了开展深空探测的热情, 纷纷推出规模庞大的月球、火星和更远的行星际探测规划。我国在这个时候不失时机地开展深空探测是及时而必要的, 也正逢其时。正如 2006 年 1 月国家领导人在科技大会上的

发言所指出的那样,在深空探测领域应急起直追,只争朝夕,通过深空探测推动我国的科技进步,促进科技创新。

目前我国正在实施的月球探测计划是“绕、落、回”三步走的第一步——绕月探测工程,核心是研制和发射嫦娥1号月球探测卫星。

现已明确将在未来一段时期内,我国将要开展的深空探测任务主要包括:月球探测二期工程;中俄联合火星探测;空间科学探测;月球探测三期工程的深化论证。

5.1 绕月探测工程

我国的月球探测规划是上个世纪90年代开始提出的,当时成立了“863月球探测课题组”进行研究论证,1998年国防科工委组织规划论证,2000—2003年提出三步走战略规划,2004年1月,温家宝总理批准嫦娥1号立项,2004年开始实施探月一期工程,研制嫦娥1号月球探测器,计划将于2007年上半年发射。

绕月探测工程的大系统组成包括:嫦娥1号月球轨道探测器,发射质量2350 kg, CZ-3A 运载火箭,西昌卫星发射场,地面测控系统,地面应用系统。

任务目标包含科学目标和技术目标。科学目标包括:获取月球表面三维影像,分析月球表面元素含量和物质类型的成分,探测月壤特性,探测地月空间环境。技术目标包括:研制和发射我国第一颗月球探测卫星,初步掌握绕月探测基本技术,首次开展月球科学探测,初步构建月球探测航天系统,为月球探测后继工程积累经验。

嫦娥1号月球轨道探测器的飞行过程包括5个阶段:运载发射,调相轨道,地月转移轨道,近月制动,环月工作轨道(工作一年,月面全覆盖)。

嫦娥1号共有9个分系统:有效载荷(含光学成像探测系统、激光高度计、 γ/x 射线谱仪、微波探测器、空间环境探测5类载荷以及载荷数管子系统),结构分系统,热控分系统,GNC(制导、导航与控制)分系统,推进分系统,供配电分系统,数据管理分系统,测控数传分系统,定向天线分系统。

嫦娥1号不同于以往我国研制的任何一颗地球卫星,在很多方面都存在技术难点,具体包括:轨道设计,GNC,热控,测控,能源,有效载荷,数据反演,地面验证等。

5.2 月球探测二期工程

二期工程是“绕落回”三步曲的第二步。目前二期工程论证已形成了《月球探测二期工程立项建议书(初稿)》,为配合立项工作,还完成了《月球探测二期工程综合立项论证报告》和大系统方案论证等8份论证报告。

月球探测二期工程既是一期工程的延伸与跨越,也是三期工程的必要基础,具有承上启下的重要作用。它以突破月球探测相关技术并获取高精度的科学探测数据为目的,掌握开展深空探测所需的一系列关键技术,推动对月球科学研究的进一步深化,获得一批自主创新的月球科研成果,建立起较为完整配套的深空探测研究、设计、生产、试验和应用体系,并培养一支高素质的人才队伍。

5.2.1 任务目标 任务目标包括技术目标和科学目标。

技术目标可概括为:突破月面软着陆技术和月面巡视技术等一系列关键技术,研制和发射月球软着陆探测器,月面巡视探测器和轨道探测器,建立基本配套的月球探测航天工程系统。

科学目标可概括为:月表形貌与地质构造调查,月表物质成分和资源勘察,月球内部结构研究,日-地-月空间环境探测与月基天文观测。

5.2.2 实施步骤 考虑到月球探测二期工程技术难度大,承担任务多,同时根据月球探测工程的延续性要求和目前技术条件的可能性等众多因素,经综合考虑,初步建议二期工程将分为两个阶段实施:

1) 2012年前后实施首次月球软着陆,掌握地月转移轨道发射技术,突破月球软着陆、月面巡视与遥操作技术、深空测控通信技术、轻小型化有效载荷技术,掌握科学探测多源数据处理、解译与应用技术,试验月夜生存技术。

2) 2015年前后实施第二阶段月面软着陆,改变着陆点,增加月面探测的覆盖范围,掌握复杂地形区域的月面软着陆和自动巡视勘察技术,掌握三位一体组合探测技术,掌握月夜生存技术,掌握多目标测控通信技术,试验月面采样技术,为探月三期工程做准备。

5.2.3 第一次软着陆方案 大系统组成:着陆探测器+巡视探测器, CZ-3B 西昌卫星发射中心,新建的34 m口径S/X频段地面测控系统, S频段统一测控系统(可覆盖火星)和地面应用系统。

任务目标包括科学目标和技术目标两部分。

科学目标：

1) 着陆探测器。着陆点三维影像探测；月壤元素含量和矿物组成；月震和小天体撞击的记录与月球内部结构的研究；进行月震的单点测量和记录，放置激光反射器和微波伪码测距仪，测量地月之间的精确距离，并设立我国第一个月面测量绝对控制点；地球等离子体层的极紫外成像探测。

2) 巡视探测器。巡视区形貌探测及地质构造研究；获取月壤（30 m）和月亮浅层（小于 3 km）结构的探测；巡视区月壤矿物含量和分布的探测；巡视区月壤粒度、电性、磁性、温度等物理特性探测。

技术目标：

掌握地月转移轨道发射技术；突破与月球软着陆相关的着陆自主导航与控制技术，桁架式主承力结构技术，着陆缓冲技术，着陆推进技术等多项关键技术；掌握月面巡视的移动及导航控制技术；试验月夜生存的热控与电源技术；建立大口径地面天线，提高测定轨精度；掌握探测器间的通信技术；进行工程参数测量，获取月球环境的第一手材料。

5.2.4 第二次软着陆方案 大系统组成：着陆探测器 + 巡视探测器 + 轨道探测器，新型大推力运载火箭与新运载火箭相应的卫星发射中心，深空测控网和 S 频段统一测控系统和地面应用系统。

任务目标包括科学目标和技术目标。

科学目标：

1) 着陆探测器。着陆点三维影像探测；月壤元素含量和矿物组成；月震和小天体撞击的记录与月球内部结构的研究，进行月震的单点测量和记录；放置激光反射器和微波伪码测距仪，测量地月之间的精确距离，并设立我国第二个月面测量绝对控制点；地球等离子体层的极紫外成像探测；甚低频射电干涉成像探测（与轨道探测器联合完成）。

2) 巡视探测器。巡视区形貌探测及地质构造研究；获取月壤（30 m）和月亮浅层（小于 3 km）结构的探测；巡视区月壤的元素探测；巡视区月壤矿物含量和分布的探测；巡视区月壤稀有气体的探测；巡视区月壤粒度、电性、磁性、温度等物理特性探测。

3) 轨道探测器。全月球尤其是月球南北极形貌和永久阴影区水冰探测（双模式雷达和中子谱仪、 γ 谱仪联合探测）；与着陆探测器一起，国际

上首次实现甚低频射电干涉成像探测；近月空间环境探测（高能粒子、低能离子）。

技术目标：

掌握复杂地形下的大载荷安全着陆技术、高精度着陆导航控制技术；掌握月面巡视移动技术、环境感知、路径规划与控制技术；掌握月夜生存技术；实现三位一体的组合探测；试验月面采样技术。

5.3 中俄联合火星探测

根据中国国家航天局最新公布的消息，中国将于 2009 年和俄罗斯进行联合火星探测，届时俄罗斯将发射火卫 1（Phobos）采样返回探测器 Phobos-Grunt，并携带由中国研制的火星探测载荷，对火星和火卫 1 进行综合探测。

5.4 空间科学探测

经过多年的论证和关键技术攻关，在空间科学探测方面我们已经开展了大量工作，近期比较明确的项目有：

1) 夸父计划。包含三颗探测器，一颗在日地拉格朗日点 L1，两颗在地球极轨运行，实现对太阳的探测，计划于 2012 年发射；

2) HXMT。即硬 X 射线天文望远镜，在地球轨道上运行，对空间射电源进行高精度探测；

3) SST。即空间太阳望远镜，在地球轨道上运行，将是世界上最大的空间太阳望远镜，对太阳进行广谱观测。

5.5 月球探测三期工程

根据中长期科技发展规划中重大专项的有关内容，我国的月球探测三期工程将在 2017 年前后向月球发射探测器，并实现无人月球采样返回。对月球探测三期工程和后续深空探测的目标而言，如何将原议的无人采样返回与未来火星探测和载人登月有机结合，以及具体实施的时机和方式还需进行广泛而深入的探讨和论证。

6 对未来我国深空探测发展方向的思考

我国未来一段时期内的深空探测发展方向正在进行细致的规划论证，同时还要兼顾中长期科技发展规划中载人航天和月球探测重大专项的进展情况，综合考虑和安排。

对未来我国深空探测领域发展的建议如下：

1) 努力完成绕月探测工程并推动二三期工程

实施,为我国开展未来深空探测活动奠定良好基础,积累经验;

2) 为逐步突破行星际飞行术、自主导航与控制 and 深空测控通信等关键技术,有计划、有步骤地开展小型的多目标多任务探测活动;

3) 结合多目标多任务探测形式,适时地开展火星、小行星和彗星等天体的科学探测;

4) 有选择地开展以空间科学为主要目标的相对独立的深空探测任务;

5) 载人航天与深空探测结合是未来深空探测

的必由之路,酌情研究二者结合的时机和实施的具体方式。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的航天 [R]. 2000-11, 北京
- [2] <http://solar.system.NASA.gov/missions/index.cfm>
- [3] <http://nssdc.gsfc.NASA.gov/>
- [4] <http://www.planetary.org/explore/topics/groups/oursolarsystem/>

Deep Space Exploration and Its Prospect in China

Ye Peijian, Peng Jing

(*Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*)

[**Abstract**] The definition, goal and impacts of deep space exploration are summarized. After a retrospect to past deep space exploration activities of human being to date, both recent deep space missions and future missions in 5 years are listed. There are also brief introductions about the future strategic plans of NASA, ESA, RAKA, JAXA and ISRO. Then the authors analyzed some important features of global deep space exploration scheme. Key technologies of deep space exploration are also determined. The status of China's deep space exploration plan is introduced including CE-1 lunar orbiter, the subsequent China Lunar Exploration Program, especially proposals for the second stage of China Lunar Exploration Program, China-Russia Mars Exploration, Kuafu Mission, Hard X-Ray Modulated Telescope, Space Solar Telescope. At the end, some suggestions for China's future deep space exploration are made.

[**Key words**] deep space exploration; interplanetary exploration; multi-object and multi-mission; China Lunar Exploration Program