

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.001

中国深空探测现状及持续发展趋势

孙泽洲^{1,2} 孟林智²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京, 100094)

摘要: 简要介绍了国外深空探测发展态势和内涵, 剖析了中国深空探测取得的成功经验与主要差距。然后重点结合中国发展现状和现实需求, 提出了中国深空探测后续发展目标, 梳理出后续任务需提前开展研究的核心技术。最后对中国深空探测的持续发展提出了建议。

关键词: 深空探测; 发展现状; 技术需求; 持续发展趋势

中图分类号: V41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)06-0785-07

Current Situation and Sustainable Development Trend of Deep Space Exploration in China

Sun Zezhou^{1,2}, Meng Linzhi²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing, 100094, China)

Abstract: This paper briefly introduces the development trend of deep space exploration abroad, and analyzes the successful experience and the main deficiencies in the filed of deep space exploration in China. Then, the paper focuses on the current development status and the technical requirements, presents the future goals on the deep space exploration in China, and lists the core technologies in advanced research. Finally, some suggestions for the sustainable development of deep space exploration in China are proposed.

Key words: deep space exploration; development situation; technical requirements; sustainable development trend

深空探测是当今世界高新科技中极具挑战性的领域之一, 是众多高新技术的高度综合, 也是体现一个国家综合国力和创新能力的重要标志, 对保障国家安全、促进科技进步、提升国家软实力以及提升国际影响力具有重要的意义。

2015 年, 国际上深空探测活动方兴未艾, 主要航天国家在深空探索领域继续发力, 成绩斐然: 7 月 14 日, 美国“新地平线”号探测器首次实现近距离飞越冥王星, 成为行星际探索的里程碑; 8 月 7 日, 欧洲空间局公布“菲莱”号发现彗星表面有机化合物的科学成果; 9 月 28 日, NASA 公布火星表

面存在液态水活动的强有力证据等。

中国的深空探测活动起步于月球探测, 目前已圆满实现了“绕”和“落”的目标, 掌握了环月与月表探测、月面软着陆及月地再入返回等关键技术, 具备了发射、测控、通信及回收等航天基础设施与能力。同时正在实施三期“月面采样返回”工程, 将于 2020 年前完成工程预定目标。在“三步走”之后, 中国深空探测如何发展已成为各方关注的重点, 这也是航天强国建设面临的重大问题。基于此, 本文剖析了国际深空探测发展态势和内涵, 结合中国发展现状和现实需求, 系统介绍了中国深空探测现状

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-11-30

作者简介: 孙泽洲, 男, 1970 年生。北京空间飞行器总体设计部研究员, “嫦娥三号”卫星探测系统总设计师, 南京航空航天大学兼职教授。

通信作者: 孙泽洲, E-mail: sunzezhou1970@126.com。

及持续的发展方向。

1 国际深空探测发展态势

截至 2015 年 10 月,世界各国针对月球以远的深空探测共开展过 231 次活动,实现了对太阳系八大行星的探访,取得了多项技术跨越和科学成果,如图 1 所示。

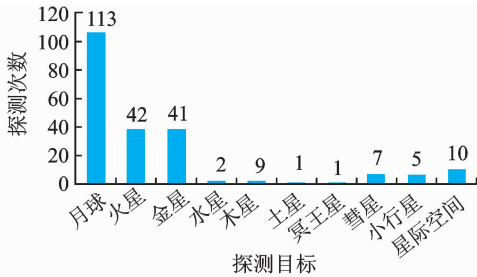


图 1 不同探测目标的探测次数

Fig. 1 Exploration times of different exploration targets

迄今为止,已独立或合作开展深空探测活动的国家和组织主要有美国、前苏联/俄罗斯、欧洲空间局、日本、中国和印度。其中,美国最早开展深空探测,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。前苏联早期创造了多项“第一”的纪录,受政治剧变影响,其发展一度停滞,近年逐渐恢复。欧洲空间局于 20 世纪 80 年代起步,发射次数虽少,但全部取得成功,在较短时间内达到了很高的水平,发展势头强劲。日本在小天体探测方面取得了很大成功,走出一条独具特色的发展之路。印度于 2013 年成功实现了首次火星探测。

进入 21 世纪,各航天国家和组织纷纷制定了深空探测计划,近期确定的深空探测活动如图 2 所示^[1]。

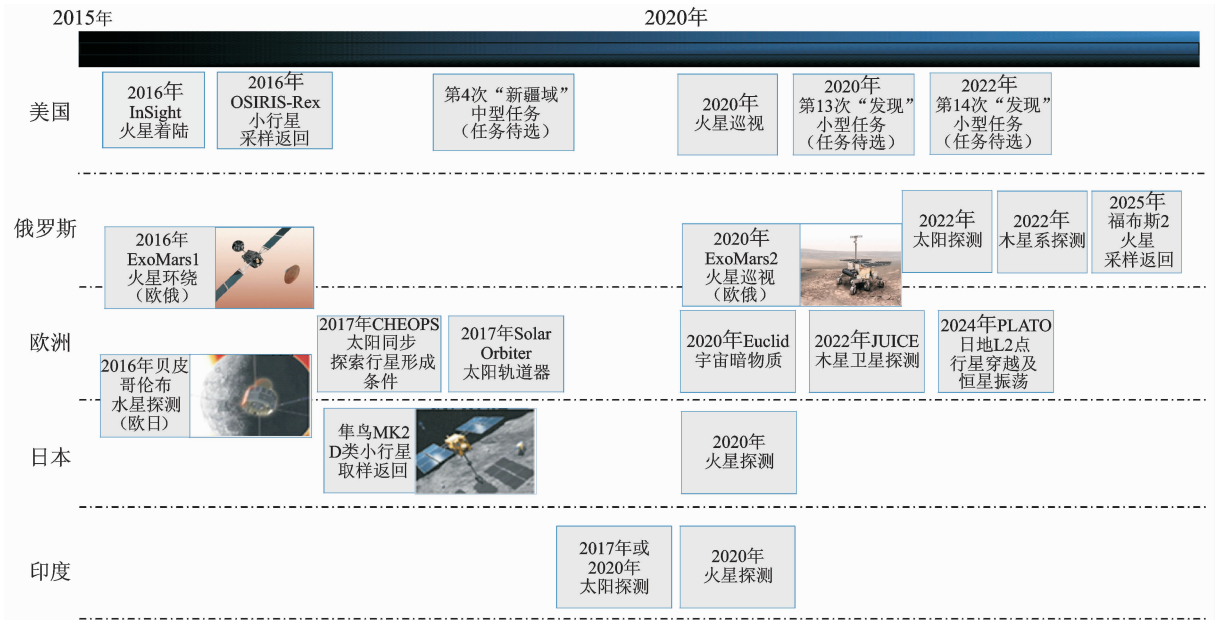


图 2 近期国际上深空探测规划任务图

Fig. 2 Recent planning missions of deep space exploration in the world

由图 2 可以看出:美国仍以延伸人类活动疆域为长远目标,通过对太阳系各类主要天体开展持续探测,全面掌握深空探测技术,确保和加强在航天领域的领导地位,近期探测目标重点是火星和小行星;欧洲空间局以实现载人火星飞行为目标,与提出同一目标的俄罗斯开展合作,将于 2020 年前实现火星着陆巡视;俄罗斯提出对太阳系其他主要天体实施探测的计划,以期在短期内重整旗鼓,重塑航天强国形象;日本发展的重点是实施多类型小行星的取样返回任务,不断发展新技术,以保持在小行星探测领域的优势地位;印度把增强航天能力作

为实现强国梦想的捷径,在 2013 年取得火星探测成功后,更加大了深空探测发展步伐,计划 2020 年前实施月球着陆巡视探测和第二次火星探测。

从各国深空探测的远景目标和任务规划分析得出,国际上深空探测总体表现出 5 个方面的发展趋势和特点。

(1) 月球探测是开展深空探测的首选目标

在全世界发射的 231 次无人深空探测任务中,以探测月球的任务最多,达 113 次,约占空间探测任务总次数的 48%。通过分析主要航天国家的空间探测战略和技术途径,几乎都是从月球探测开始

的,月球已成为各航天国家发展空间探测的首选目标^[2]。进行月球探测的下一步工作仍是利用机器人技术、先进钻岩技术、先进测量分析技术以及采样返回任务等对月球地质地貌、矿物资源及其蕴藏量进行全面深入的勘察,为建立月球基地获取重要的数据资料。月球还将成为人类进军更远星体探测的技术试验场,以及开展宇宙及天体物理观测的极佳场所。

(2)火星是目前行星探测的最大热点

作为距地球最近的类地行星之一,火星探测是继月球探测之后行星探测的最大热点,是未来载人行星探测的重要目标。迄今世界探测火星的任务共发射42次,占空间探测任务总数的18%,发射的探测器数量仅次于月球。随着空间探测技术的不断提高以及火星探测的潜在需求,火星探测活动的第三阶段将进一步向无人采样返回发展。在该阶段,探测器将获取火星土壤、钻取火星岩石,并将样品带回地球进行详细研究,以便为未来载人火星飞行提供依据和支持。

(3)小天体探测成为深空探索领域的重点发展目标之一

小天体(包括小行星和彗星)探测具有两方面的重要意义。首先,小天体保留了太阳系形成之初的状态,对小天体物质组成和演化过程等方面的研究有助于了解太阳系的起源和演化过程,可增进人类对太阳系的科学认识。其次,一些近地小行星在运行过程中,受到大天体的摄动作用,运行轨道不断变化,小行星或者其碎片经常造访地球,可能与地球相撞,是地球和人类社会长久生存的潜在威胁。对一些小行星的探测有助于人类评估地球潜在的风险,并为提出可能的预防或应对策略提供参考。目前各航天国家对小天体的探测极为重视,都在其未来空间探索计划中涵盖了小天体探测计划。

(4)探测方式日趋多样,逐步由技术推动转向科学带动

美国和俄罗斯两国在深空探测活动中,由易到难,逐步掌握了飞越、撞击、环绕、软着陆、巡视及采样返回等多种探测方式。为提高任务效益,各国家和组织越来越重视通过组合方式,在一次任务中实现对多个目标、或利用多种手段进行探测,用较小成本扩展任务能力。在深空探测的“竞争期”,发射任务密集,成功率低,但技术进步很快;发展到“成熟期”,发射任务相对较少,成功率明显提高,科学成果丰富。可以看出,前一阶段的主要推动力是发展技术,追求飞得更远、更接近目标、更长时间探

测。随着技术能力逐渐增强,逐步由发展技术转向服务科学,更加关注“去干什么”。

(5)大型探测任务的国际合作模式成为重要的发展途径

深空探测具有全球性、科学性和开放性,因此更具有国际合作的必要性和可行性,而且深空探测数据的分析研究也需要世界范围内科学家的广泛参与。随着深空探测任务越来越复杂,规模也越来越大,加上目前国际大环境中经济、政治等多重因素,独立进行高挑战性、高风险的深空探测活动难度较大,负担过重。因此,目前许多研发中的大型深空探测任务趋向于国际合作模式,例如美国的“欧罗巴木星系任务”、欧洲空间局的“火星生物学”和“贝皮-哥伦布”任务等,都是两国或多国合作的深空探测任务。从长远来看,国际合作是重要的发展趋势。

2 中国深空探测现状及差距

2.1 “嫦娥一号”卫星技术突破

中国于2004年开始实施探月工程,取得了举世瞩目的成就,成为中国创新能力的重要标志。中国第一个月球探测器“嫦娥一号”卫星于2007年10月成功环月探测,圆满实现了探月工程一期“绕”的目标,达到2000年后发射的同类探测器先进水平。经在轨飞行验证,“嫦娥一号”卫星突破了三体轨道设计、自主制导导航与控制、远距离测控数传等一系列关键技术^[3]。

(1)基于调相、最小能量和多次制动的轨道设计技术:“嫦娥一号”卫星采用了3次地球调相轨道和多次月球减速制动的方案,有效地将每月1天的发射机会扩大到每月连续3天^[4];建立了三体问题下轨道设计的数值方法及模型,设计了环绕月球的回归轨道。

(2)高精度强自主制导、导航与控制技术:为满足多次复杂轨道控制任务的高可靠、强自主要求,设计了性能先进、适应深空探测任务的控制系统体系结构,解决多类冗余部件进行系统集成的复杂系统匹配问题;提出纯数字相平面和脉宽调制融合的姿态控制、多传感器(紫外传感器、星传感器、陀螺)组合定姿、月球轨道实时外推等高性能控制算法^[5],突破了全方位惯性定向的高可靠高精度自主轨道控制和环月三体指向自主控制等关键技术。

(3)地月距离的星载测控通信技术:“嫦娥一号”卫星发射时,中国尚未建成深空测控站,仅有经改造后最大口径为18 m的天线(国外地面至少都

有 35 m 口径天线)。为此,卫星设计采用了多种技术手段,如通过异频分路以及合理布局提高全向天线增益,提高星载测控系统的 G/T 值和等效全向辐射功率(Effective isotropic radiated power, EIRP)值等。

2.2 “嫦娥二号”卫星技术突破

2010年10月,“嫦娥二号”卫星作为探月工程二期任务的先导星,成功地完成了环月的先导探测,并完成了多阶段拓展任务,通过一次发射任务完成了月球、日-地 L2 点和图塔蒂斯小行星的多目标探测^[6],取得了“低成本、高质量、高回报”的突出实效,突破了一系列关键技术。

(1)直接地月转移与机动飞行控制技术:基于拟冻结轨道理论,设计了可长期稳定保持的 100 km 环月轨道和 100 km × 15 km 虹湾成像轨道,解决了短时间内轨道高度变化易超标的问题^[7];采用自主惯性对准技术,实现了轨控准备过程的全自主控制。

(2)日-地 L2 点轨道设计与控制技术:针对日、地引力平动点摄动复杂、轨道设计无解析解以及测控距离远等难点,经精确求解设计了李莎如(Lissajous)平动点轨道^[8];突破了距地 150×10^4 km 外的日-地拉格朗日 L2 点的转移轨道设计与控制技术,在国际上首次实现从月球轨道出发至日-地拉格朗日 L2 点的飞行探测。

(3)小行星交会轨道设计与交会控制技术:利用拉格朗日点伴地绕日特性,在卫星推进剂、星地通讯距离和地面大天线研制进度等约束条件下,采用探测目标选取策略,选定“图塔蒂斯”小行星为目标,设计了逼近飞越控制和高速交会渐远点凝视成像技术,解决了飞越相对速度快、相对距离不确定等约束下的成像方案^[9];突破并验证了交会轨道设计和交会控制等技术。

2.3 “嫦娥三号”卫星技术突破

2013年12月14日,“嫦娥三号”探测器成功着陆在月球虹湾地区;12月15日,“玉兔”号月球车行走的车辙印在了月球表面。“嫦娥三号”任务圆满成功,首次实现了中国航天器在地外天体软着陆和巡视勘察,标志着中国探月工程第二步战略目标的全面实现^[10]。“嫦娥三号”任务是中国航天领域迄今最复杂、难度最大的任务之一。突破的核心技术包括^[11]:

(1)多学科总体设计技术:基于“嫦娥一号”“嫦娥二号”探测结果,针对任务面临的新环境,自主建立了月球引力场、红外、表面温度场分布以及月表

地形地貌等总体设计模型,并集成当今数字应用、计算机、智能控制和信息通讯等技术,构建了月球探测任务系统仿真设计分析和支持平台。

(2)软着陆自主制导、导航和控制技术:软着陆过程的导航、制导、避障和姿态控制等方面大量控制方法和策略均为国内首次应用,同时实现了微波测距测速传感器、激光测距传感器和激光三维成像传感器等一系列新型传感器的工程应用。

(3)复杂推进系统设计和变推力发动机技术:采用系统流阻匹配技术、防晃防旋技术和系统减压调节技术,解决了系统并联均衡排放、液体防晃及大流量变工况下系统稳定工作等一系列推进系统设计难题;自主研发出中国第一台航天器用高比冲高控制精度的变推力发动机。

(4)软着陆缓冲技术:采用了“悬臂式”的构型设计、压紧释放与展开锁定装置与辅助缓冲器的集成设计等创新设计方案,解决了着陆缓冲、着陆稳定性和利于巡视器释放等多方面的问题;研制新型常温超塑性材料,延伸率超过 70%,解决了拉伸吸能缓冲难题。

(5)月面移动与生存技术:针对移动系统设计提出了多种移动创新形态;首次采取了重力辅助两相流体回路,引入同位素热能解决月夜生存难题;创新设计了基于光照的自主唤醒方案,首次实现了中国航天器在轨长期休眠和自主唤醒的工作模式。

(6)自主导航与遥操作控制技术:采用立体视觉技术实现月面未知环境的三维恢复与重建;提出了基于立体视觉的局部自主避障算法,完成巡视器自主局部路径规划,提高了探测器适应月面复杂地形的能力。

2.4 探月三期工程技术突破

2014年11月1日,探月三期月地高速再入返回飞行器在内蒙古四子王旗地区顺利着陆,标志着中国月球探测领域技术的又一次重大进步^[12],突破了半弹道跳跃式再入气动、热防护、再入制导导航与控制等关键技术。

目前探月三期“嫦娥五号”任务正在工程实施中,通过“嫦娥五号”的研制和实施,将具备月球无人采样返回的能力,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,实现航天技术的重大跨越。

2.5 技术差距

通过探月工程的实施,中国在深空探测中已取

得了一定的成就。但总体来看,深空探测能力与航天强国相比、与中国的国家地位相比,依然存在一定的差距,主要表现在以下3个方面:

(1)探测规模存在不足。中国深空探测目标还比较单一,目前的探测活动均集中在月球,“嫦娥二号”扩展任务仅实现了对小天体的飞越探测,还没有扩展到其他天体,使得对太阳系的认识和对探测技术手段的使用还比较局限。

(2)技术能力亟待提升。深空探测所涉及的飞行任务设计、借力飞行、自主导航、高效能源、月球资源开发利用能力、火星着陆巡视及采样返回、以及小行星附着采样和防御等研究尚处于起步阶段,距离工程实施还有一定的差距。运载以及深空测控通信能力尚不能支持更大规模、更远距离探测。

(3)原始创新能力有待加强。当前影响深空探测持续发展的瓶颈制约问题尚未得到根本解决。科学问题牵引发展能力缺乏,对影响未来发展的前沿科技方向缺乏总体部署,提出独创探测任务能力较弱,原始创新能力与美俄相比仍存在较大差距,难以满足未来发展需求。

3 中国深空探测持续发展目标

当前,中国深空探测仍属起步阶段,面临着与美国、俄罗斯及欧洲等国差距拉大,甚至被印度超越的现实。中国适时开展适度规模的深空探测活动,对于提升进入空间、利用空间能力、探索未知领域、促进人类进步以及提升国家创新能力,具有重要意义。

未来中国深空探测领域的发展路线既要结合国际的发展趋势,也要符合中国的发展需求和实际基础。应围绕太阳系的起源与演化、小行星和太阳活动对地球的影响以及地外生命信息探寻等空间科学重大问题,统筹开展类地行星、巨行星、小行星和太阳的探测^[13]。中国未来一段时间深空探测领域建议在两个方向发展:(1)以月球为探测目标,以完善月球探测技术和体系、开展月球资源利用为宗旨的月球探测主线;(2)以火星为主要探测目标,以科学探索和技术推动为行星际探测主线。

4 未来深空探测技术发展需求

4.1 发展需求

由于深空探测任务目标范围广、飞行距离远及运行时间长等特点,与传统的近地航天器相比,技术发展需求主要体现在:

(1)探测方式:地月系探测—太阳系大尺度探

测—探索型探测—开发型探测;

(2)飞行距离: 40×10^4 km— 4×10^8 km— 15×10^8 km—飞出太阳系;

(3)任务周期:1年—3年—10年—35年;

(4)测控通信:S频段—X频段—Ka频段—更高频段和光通信;

(5)动力能源:太阳能—太阳能+同位素—空间核反应堆;

(6)自主运行:地面控制—1~6个月无人干预;半自主+遥操作—全自主;

(7)空间推进:化学推进—电推进(3 000 s左右)—多模式组合推进;

(8)地外着陆:无大气天体着陆架缓冲形式—有大气天体再入—小天体弱引力附着—新型着陆方式。

4.2 相关技术

针对未来深空探测任务目标,结合目前发展现状和任务需求,共梳理出6类需提前进行攻关和开发的技术。

(1)轨道设计。深空探测器的轨道设计,不再像近地轨道卫星那样可以用二体问题方法进行近似,必须根据具体情况考虑限制性三体问题或多天体作用下的轨道设计方法。与此同时,近年来还出现了借助天体重力场进行借力飞行、借助大气天体的气动减速等新设计概念和方法,结合任务规划中的其他约束,对轨道设计提出了更高的要求。开展深空探测轨道设计研究不但能够提高中国在这方面的技术水平,还能促进天体力学等基础学科中科研成果的应用、实践和发展。未来深空探测任务涉及的轨道设计包括借力飞行轨道设计、小推力过渡轨道设计、行星大气高速再入技术、无大气天体软着陆轨道设计和平动点应用技术等。

(2)自主技术。深空探测器飞行距离遥远,导致地面测控困难、通讯延迟大,利用地面测控很难实时提供深空探测任务所需要的高精度轨道信息,尤其在探测器着陆和接近目标天体等关键飞行阶段,不可能像传统航天器那样依赖于地面的测控,须由探测器自主确定探测器的位置和姿态,包括在行星表面工作的巡视探测等特殊形式探测器,对导航定位、特别是自主导航定位需求迫切。由于深空探测器一般与地面的通讯机会有限且时间间隔较长,某些任务长达一周或几周才能与地球通讯一次,这意味着深空探测器必须在长时间没有监控的情况下运行和进行科学探测。因此深空探测器除了需要自主确定飞行姿态和轨道,还应对探测器的

工作状态进行自主监测,能够在一定范围内自主决定要进行的任务,并能对出现的一些故障进行星上在轨的自主定位、诊断和修复或重构。

(3)通信技术。深空测控通信技术发展的长远目标是实现太阳系内任何时间任何地点的连续通信和精确导航,与远至数亿千米的深空探测器进行测控通信,要求远远高于与普通的地球航天器间的测控通信,必须尽可能采用最先进的技术,不断提高通信链路和测控精度,以满足日益增多和不断发展的深空探测任务的需求。针对未来深空探测任务需求,行星际深空通信将在系统体系结构、核心技术上有较大突破,重点研究10亿千米以远测控通信网络架构,轻小型一体化X/Ka频段测控应答机、光通信等技术。

(4)推进技术。推进技术一直是人类进入空间能力的决定性因素之一。深空探测任务对发射能量的需求很大,单独依靠提高运载发射能力很难满足所有的任务需求,因此探测器需具备较强的机动能力,往往需要提供数千米每秒以上的速度增量,而传统的化学推进比冲很难超过500s,难以满足深空探测任务的需求。因此亟需发展比冲更高、寿命更长以及性能更优越的新型先进推进技术。新型先进推进技术的主要类型根据能源输入的不同分为电推进、太阳能推进和核推进等;还有一类是有别于工质推进的新概念推进,如太阳帆推进、等离子磁帆推进技术等。

(5)进入、下降与着陆技术。目前中国仅实现了月球无大气天体的软着陆,未来将实施火星(稀薄大气)、金星(稠密大气)和小天体(弱引力)的进入与着陆探测,掌握行星进入及着陆技术将极大丰富未来中国深空探测的手段,提高深空探测的广度和深度。主要研究方向包括月面复杂地形安全着陆技术、缓冲与移动一体化机构技术、地外天体大气减速技术、地外天体软着陆技术、地外天体表面巡视技术、小行星交会/附着/复飞技术以及行星际返回地球再入回收技术。

(6)载荷技术。为完成特定的科学目标探测,需要研制各种科学探测仪器设备,深空探测目标众多,所经历的环境特点各不相同,从而提出了对深空探测科学载荷种类多样性的要求。高精度、高性能、多功能的科学探测仪器是一个国家科技水平的重要反映,并且随着诸如微机械和微电子等基础技术的发展和一些新探测原理的出现,会不断涌现新的探测载荷形式和技术,有助于推动中国科学仪器设备研制的创新和工程实现技术水平提高。

5 中国深空探测持续发展建议

长期以来,国际、国内关于深空探测的争论从未停息,有时甚至相当激烈,但并不妨碍中国深空探测的不断发展、不断取得突破性成果并且不断丰富人类对宇宙和地球的认识,推进人类文明达到新的高度。通过探月工程,中国开始了走向深空之旅,并已取得了丰硕成果,成为了国家创新能力的重要标志。未来中国航天人需要超越经济利益及短期效益,站在人类发展的高度,以挑战自我、引领发展的勇气,推动中国深空探测领域的持续发展,具体建议如下:

(1)做好长远规划和顶层设计

深空探测作为对航天技术、国防建设以及科学技术发展具有巨大带动作用的高科技领域,虽然在不同阶段有着不同的外部环境和特点,但其作为国家战略的重要支撑这一点始终没有改变,在航天领域的重要地位和突出带动作用也始终没有改变,需不断树立新目标,向更高水平发展。中国深空探测刚刚起步,面临追赶和被超越的双重压力,要在较短的时间内缩短与世界先进水平的差距,应统筹科学需求与技术进步,梳理深空探测的需求与目标,做好长远规划和顶层设计,制定符合中国国情、有中国特色的深空探测发展战略;并在国家层面给予持续稳定的政策支持,确保在现有地位的基础上,持续增强深空探索能力。

(2)加强核心技术储备

中国月球探测以工程实施为主线,起步晚但起点较高,任务实施时相对关注工程目标,在突破前沿技术的预期规划和保障机制方面需要加强。面对未来更复杂的深空探测活动,技术储备不足、体系不完善等问题已凸显。建议后续以提升深空探测基础技术能力为目标,围绕“月球探测和火星探测”两条主线,抓住时机、循序推进,重点突破深空探测共性关键技术,包括行星际轨道设计、测控通信以及自主导航与控制、推进等,形成深空探测基本能力和工程体系,提升进出空间、地外生存等核心能力,为工程发展创造更大主动性和灵活性。

(3)重视深空探测科普作用

深空探测不仅孕育着重大科学发现,而且对科学技术本身也会产生巨大的牵引和带动作用,与中国建设科技强国、创新型国家的长远发展思路相吻合。一个国家、一个民族只有站在历史的高度,为全人类的发展做出应有的贡献,才能成为一个负责任的大国和一个有希望的民族。通过深空探测,在

全社会广为传播科学知识、科学方法、科学思想和科学精神,激发年轻一代探索追求精神,达到为中国的科技发展提供强大的基础和后劲,促进社会主义和谐社会可持续发展的目的。

(4) 积极推进和开展国际合作

探索太空是全人类的共同使命,深空探测具有技术和科学相融合的鲜明特征,加强国际合作已经成为世界航天国家的必然选择。建议积极配合国家整体战略布局和外交大局,探索航天科技国际合作新模式,进一步加强多部门、多领域及多学科协作,发挥互补优势,强化优势、强强联合;同时在坚持自主创新、独立掌握核心关键技术的基本原则下,在技术和任务中多渠道、多层次地积极推进国际合作,学习先进技术、交流设计思想、借鉴工作方法,全面推进中国深空探测领域的发展。

参考文献:

- [1] Schlutz J, Vangen S, Haese M, et al. Assessment of technology developments for the ISECG global exploration roadmap[C]// Global Space Exploration Conference. Washington D C, USA: International Space Exploration Coordination Group, 2012: 1-11.
- [2] 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(6): 543-558.
Ye Peijian, Huang Jiangchuan, Sun Zezhou, et al. The progress and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. Sci Sin Tech, 2014, 44(6): 543-558.
- [3] 叶培建, 孙泽洲, 饶炜. 嫦娥一号月球探测卫星研制综述[J]. 航天器工程, 2007, 16(6): 9-10.
Ye Peijian, Sun Zezhou, Rao Wei. Research and development of Chang'e-1[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(6): 9-10.
- [4] 杨维廉. 发射极月卫星的转移轨道研究[J]. 航天器工程, 1997, 6(3): 19-33.
- [5] 黄江川, 张洪华, 李铁寿, 等. 嫦娥一号卫星的制导、导航与控制[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(1): 29-32.
Huang Jiangchuan, Zhang Honghua, Li Tieshou, et al. The guidance, navigation and control for CE-1 spacecraft[J]. Aerospace Control and Application, 2008, 34(1): 29-32.
- [6] 叶培建, 黄江川, 张廷新, 等. 嫦娥二号卫星技术成就与中国深空探测展望[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(5): 467-477.
- [7] 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): 24-27.
Zhou Wenyan, Yang Weilian. Orbit design for Chang'e-2 lunar orbiter[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(5): 24-27.
- [8] 周文艳, 黄昊, 刘德成, 等. 嫦娥二号卫星日地 L2 点扩展任务轨道设计[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(6): 609-613.
- [9] 黄江川, 王晓磊, 孟林智, 等. 嫦娥二号卫星飞越 4179 小行星逼近策略及成像技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(5): 478-486.
- [10] 孙泽洲, 张廷新, 张焯, 等. 嫦娥三号探测器的技术与成就[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(4): 331-343.
Sun Zezhou, Zhang Tingxin, Zhang He, et al. The technical design and achievements of Chang'e-3 probe [J]. Sci Sin Tech, 2014, 44(4): 331-343.
- [11] 孙泽洲, 贾阳, 张焯, 等. 嫦娥三号探测器技术进步与推动[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(11): 493-498.
Sun Zezhou, Jia Yang, Zhang He, et al. Technological advancement and promotion roles of Chang'e-3 lunar probe mission[J]. Sci Sin Tech, 2013, 43(11): 493-498.
- [12] 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(2): 111-123.
Yang Mengfei, Zhang Gao, Zhang Wu, 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(2): 111-123.
- [13] 叶培建. 中国深空探测发展展望与思考[R]. 2007 年高技术发展报告. 北京: 科学出版社, 2007.