

深空探测发展与未来关键技术

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: 深空探测指人类对月球及以远的天体或空间环境开展的探测活动,作为人类航天活动的重要方向和空间科学与技术创新的重要途径,是当前和未来航天领域的发展重点之一。在简要总结深空探测 50 多年的发展历程与未来发展趋势的基础上,重点分析了深空探测发展的 5 个特点,提出了未来深空探测应重点研究和突破的 6 类关键技术。

关键词: 深空探测; 历程与规划; 发展特点; 关键技术

中图分类号: V41 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2014)01-0005-13

Development of Deep Space Exploration and Its Future Key Technologies

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: Deep space exploration is the term used for the exploration of the Moon and the celestial bodies or deep space beyond the Moon. It's a major part of human space activities and an important approach for space science and technology innovation. Based on the retrospection of the development and accomplishment of deep space exploration over the past 50 years and summary of the development route-map of deep space exploration of different space countries and regions, this paper analysed five developmental characteristics of deep space exploration, and proposed six kinds of key technology fields focused on and addressed for future deep space exploration activities.

Key words: deep space exploration; development process and route-map; developmental characteristics; key technology

0 引言

对未知世界的探索,是人类发展的永恒动力;对茫茫宇宙的认知,是人类的不懈追求。进入 21 世纪以来,随着航天技术与空间科学的飞速发展,人类认识宇宙的手段越来越丰富,范围也越来越广,开展地月日大系统研究^[1],探索更深更远更广阔的太空,已成为人类航天活动的重要方向。

关于深空探测的定义,目前存在几种不同的主张。1988 年国际电信联盟把深空探测定义为对 200 万千米以远的天体或空间环境进行的探测^[2];另一种定义是对月球及以远的天体或空间开展的探测活动^[3];也有把脱离地球引力场,进入太阳系空间或

宇宙空间进行的探测称为深空探测。我们一般采用第二种定义。

开展深空探测活动是人类探索宇宙奥秘、寻求长久发展的必然途径,是在近地空间活动取得重大突破的基础上,向更广阔的太阳系空间的必然拓展。其意义一是有利于促进对太阳系及宇宙的形成与演化、生命起源与进化等重大科学问题的研究,从而进一步认识地球以及空间现象和地球之间的关系;二是有利于推动空间技术的跨越式可持续发展,从而不断提升人类进入太空的能力;三是有利于催生一系列基础性、前瞻性的新学科、新技术,从而促进一系列相关科学技术的发展;四是有利于培养和造就创新型人才队伍,从而推动人类社会可持续进步^[4]。

本文在简要总结深空探测 50 多年发展历程与未来发展趋势的基础上,重点分析了深空探测发展的 5 个特点,提出了未来深空探测应重点研究和突破的 6 类关键技术。

1 深空探测发展历程与趋势

1.1 深空探测的发展历程

自 1958 年 8 月美国发射世界上第一颗月球探测器“先驱者 0 号”(Pioneer 0),至 2013 年 12 月欧空局发射“盖亚”(Gaia)探测器,世界各国共实施深空探测任务 242 次,成功或部分成功 136 次,失败 100 次,仍在飞行途中 6 次,成功率约为 56%。

深空探测 50 年的发展经历了两个高潮期:一为 1958 - 1976 年,二为 1994 年至今。

1958 - 1976 年的深空探测第一个高潮期,是美、苏两国在冷战背景下的空间竞赛期,共实施 166 次探测任务,其标志性成果是实现了无人月球采样返回和载人登月。这既充分展示了两个航天大国的国家意志和综合实力,又极大地促进了空间技术和空间科学的快速发展和巨大进步。

1994 年美国发射的“克莱门汀”(Clementine)月球探测器发现了月球可能存在水冰^[5],掀起了深空探测的第二次高潮,迄今共实施了 53 次探测任务。其显著标志一是欧空局、日本、中国和印度等加入深空探测国家行列,二是实现了小天体采样返回和火星巡视探测。

不同时期深空探测活动统计如图 1 所示。

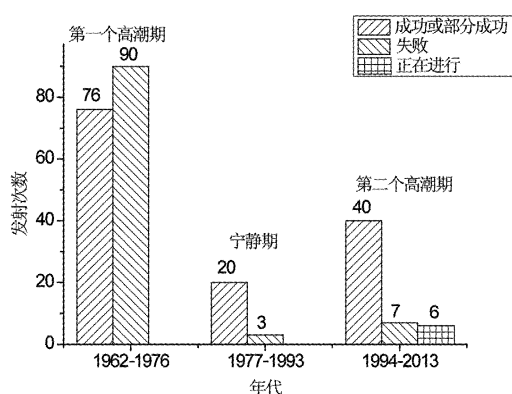


图 1 不同时期深空探测活动统计

Fig. 1 Statistics of deep space exploration activities during different periods

迄今为止,世界上只有美国、苏联/俄罗斯、欧空局、日本、中国、印度开展了深空探测活动。美国是最早也是目前唯一对月球、太阳、行星、小天体及太

阳系均进行过探测活动的国家,保持着绝对领先地位。苏联/俄罗斯早期的深空探测任务曾创造了多个第一,但自 1996 年“火星 96”(Mars 96)任务失败后,至今只于 2011 年发射了“福布斯土壤”(Phobos-Grunt)任务,且未能进入预定转移轨道。日本虽在行星探测方面受挫,但在小天体探测方面取得较大成功。欧空局对月球、火星、金星、小天体等进行了探测,且在较短时间内达到了很高的水平。

中国共实施了 3 次月球探测,均获圆满成功。2007 年 10 月首次成功发射“嫦娥一号”月球探测器,实现了“精确变轨,成功绕月”的预定目标,获取了 120 m 分辨率全月图和大量科学数据。2010 年 10 月发射的“嫦娥二号”月球探测器,获得了 7 m 分辨率全月图和 1.5 m 局部影像图,发现了铬元素和月球微磁场的存在,之后相继进行了日地拉格朗日 L2 点为期 10 个月的环绕探测和对“图塔蒂斯”(Toutatis)小行星的飞越探测,国际上首次获得该小行星的 10 m 分辨率图像(如图 2 所示),验证了小行星目标选择和深空轨道设计技术。2013 年 12 月,成功发射“嫦娥三号”月球探测器,实现了月球软着陆和月面巡视勘察,并首次获得了地球等离子体层图像(如图 3 所示)、月基观测天文图像和月表浅层剖面图等科学探测成果。



图 2 “嫦娥二号”所拍“图塔蒂斯”图

Fig. 2 Image of Toutatis by CE-2

世界各国和组织深空探测活动统计如图 4 所示。

目前,人类开展的深空探测活动已基本覆盖太阳系各类天体,如月球、太阳、七大行星及其卫星、矮行星、小行星和彗星等,不同天体探测活动统计如图 5 所示。

通过 50 多年的深空探测活动,人类取得了载人登陆月球、小天体采样返回、发现火星表面存在水冰、深空环境信息获取等重要成就,使得对月球、火

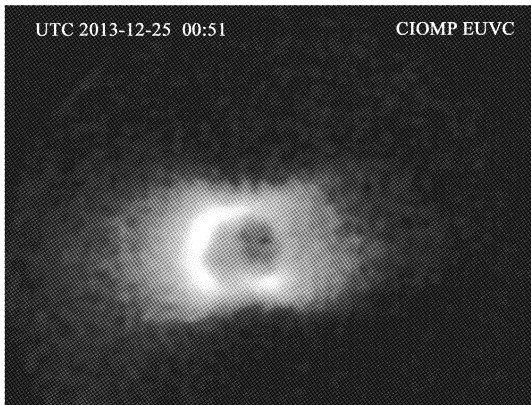


图 3 “嫦娥三号”所拍地球等离子体层图
Fig. 3 Image of Earth plasmasphere by CE-3

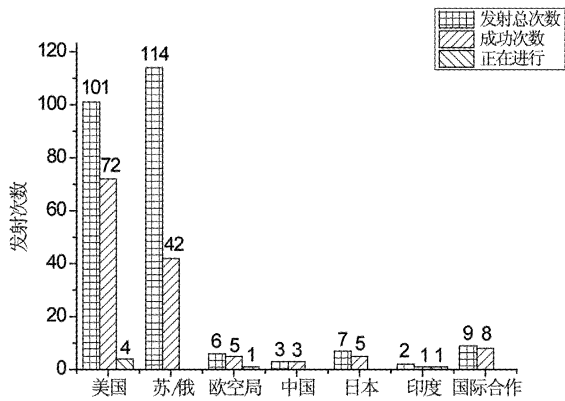


图 4 世界各国和组织深空探测活动统计
Fig. 4 Statistics of deep space exploration activities of different countries and regions

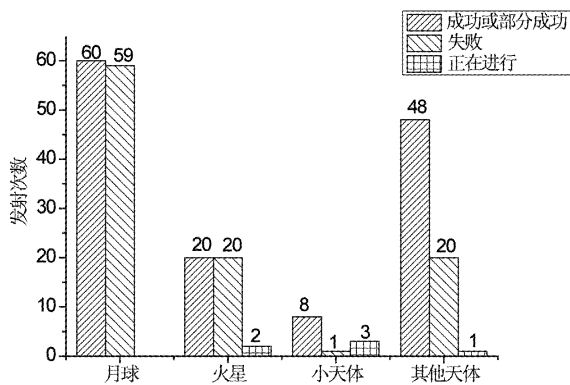


图 5 不同天体探测活动统计
Fig. 5 Statistics of deep space exploration activities of different celestial bodies

星、小天体、金星、太阳的认识更加深入,成功研制了大推力运载火箭、深空测控网等,人类进入太空的能力有了极大提高,同时也促进了力学、物理、天文、材料、信息等基础学科的发展。

1.2 深空探测发展趋势

进入 21 世纪,美国、俄罗斯、欧空局、日本和印度等主要航天大国和组织都制定了 20 年乃至更长远的深空探测发展规划,探测的重点集中在月球、火星、小天体等。未来国外较为明确的探测任务如表 1 所示。

表 1 国外深空探测活动规划

Table 1 Future deep space programs of foreign countries

国家	目标	时间	名称	类型
美国	火星	2016	InSight	着陆探测
美国	火星	2020	待定	着陆探测
美国	小行星	2016	OSIRIS-Rex	采样返回
美国	太阳	2018	Solar Probe Plus	近距离观测
美国	L2	2024	WFIRST	天文观测
俄罗斯	月球	2015	Luna-25	着陆探测
俄罗斯	月球	2016	Luna-26	环绕探测
俄罗斯	月球	2017	Luna-27	着陆探测
俄罗斯	月球	2018	Luna-Grunt	采样返回
俄罗斯	月球	2020	Lunny-Poligon	着陆探测
俄罗斯	火星	2022	Phobos-Grunt 2	采样返回
俄罗斯	火星	2024	Mars-Grunt	采样返回
俄罗斯	木卫三	2023	Laplas-P	着陆探测
俄罗斯	小行星	2020	Apophis	交会探测
欧空局	月球	2018	待定	着陆探测
欧空局	太阳	2017	Solar Orbit	近距离观测
欧空局	火星	2016	ExoMars1	环绕探测
欧空局	火星	2018	ExoMars2	着陆探测
欧空局	木星	2022	JUICE	环绕探测
欧空局	L1	2015	LISA pathfinder	天文观测
欧空局	L2	2018	JWST	天文观测
欧空局	L2	2020	Euclid	天文观测
欧空局	L2	2024	P LATO	天文观测
日本	月球	2017	SELENE-2	着陆探测
日本	月球	2020	SELENE-X	着陆探测
日本	小行星	2014	Hayabusa-2	采样返回
日本	水星	2015	Bepi Colombo	环绕探测

美国将于 2016 年开展“洞悉号”(InSight)火星着陆任务,对火星内核进行探测(如图 6 所示)。2020 年将再次开展火星着陆任务,为 2025 年左右实现火星取样返回、2035 年左右实现载人环火探测和载人火星登陆作技术储备;将在 2016 年发射的“源光谱释义资源安全风化层辨认探测器”(OSIRIS-Rex),对小行星 1999RQ36 进行采样,并于 2023 年返回地球,这是美国的首次小行星采样返回任务。美国还计划于 2018 年发射首颗飞入日冕的“太阳探针+”(Solar Probe Plus)探测器,采用行星借力飞行技术,通过 7 次金星借力到达距太阳表面

约 700 万千米处,探测其周围的等离子体、磁场、高能粒子和尘埃,为太阳日冕加热机制、太阳风的形成和演变等问题的研究提供科学数据^[6]。

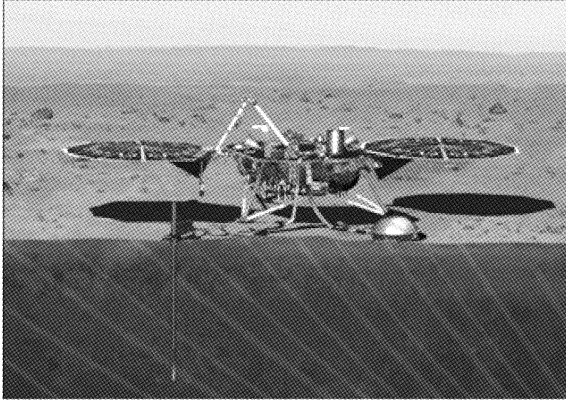


图6 美国“洞悉号”火星任务示意图

Fig. 6 Scheme of InSight Mars mission of NASA

俄罗斯计划于 2015—2018 年发射月球轨道器及着陆器,对月球大气及土壤环境进行探测,同时对月球采样返回的新技术进行验证;此外“月球基地”(Lunny Poligon)任务也在研究当中^[7-8];计划与欧空局合作,计划分别于 2016 年和 2018 年实施火星着陆任务,其中 2016 年将发射火星轨道探测器,执行火星微量气体探测;2018 年发射火星车,实施着陆巡视探测^[9];2022 年左右发射“福布斯土壤 2 号”(Phobos-Grunt 2),再次尝试对火卫一进行采样返回探测;2024 年后实施“火星土壤”(Mars-Grunt)任务,对火星进行采样返回探测。

日本的深空探测主要是无人探测,并以月球和小天体探测为主线,计划于 2017 年左右实施“月亮女神-2”(SELENE-2)着陆探测;2020 年左右开展“月亮女神-X”(SELENE-X)着陆探测,并规划了长远的载人登月任务^[10-11];日本还计划于 2014 年发射“隼鸟-2 号”(Hayabusa-2),对 1999JU3 小行星开展采样返回探测^[12]。欧空局计划于 2018 年在月球南极着陆。印度 2013 年 11 月发射了火星探测器,目前正在奔向火星的途中。此外,中国计划 2020 年前实现月球无人采样返回。

从以上对未来深空任务的归纳总结可以看出,人类未来一段时期的深空探测仍以科学探索和技术创新为主要驱动力,探测方式将从飞越观测、环绕探测向着陆探测、采样返回、载人登陆以及地外基地建设方向发展。深空探测的主要目的—是对宇宙形成与演化及生命起源与进化进行更深入的探究,增进

对太阳系及其天体的认识;二是促进航天技术创新发展,并带动一系列基础与支撑技术持续进步;三是服务国家整体战略,提升国家实力,促进国家经济社会可持续发展。

2 深空探测的发展特点

总结 50 多年来深空探测的发展历程,分析研究各主要航天大国和组织未来几十年的发展规划,可以看出深空探测活动有如下 5 个特点。

2.1 深空探测是航天发展的重要方向之一

为了实现走出地球、进入太空的梦想,人类需要不断揭示宇宙的奥妙,深化对宇宙的认识,并进一步通过各种形式的深空探测活动提升进入深空的能力。这是超越国家、民族和时代的人类的共同追求。深空探测是当今科学技术最为活跃、最受注目、取得成果最丰富的领域之一。

20 世纪中后期,美苏为展示各自的实力,在包括月球在内的深空探测方面开展了激烈的竞争,甚至有时冒着巨大的技术风险,强行实施某些任务以期超越对手。美国通过“阿波罗计划”一举确立了其在空间技术方面的领先地位,这极大地鼓舞了美国民众的士气,衍生出了一系列的科技创新和成果,这些成果后来广泛应用于美国科学技术和社会生活的各个领域,产生了难以估量的巨大效益。

进入新世纪以来,美国、俄罗斯、欧空局、日本都制定了长远的深空探测目标。从表 1 可以看出,各主要航天大国和组织,基本上都是以独立自主的方式开展深空探测活动,都把深空探测作为航天发展的重要方向。尤其是美国在继续开展月球探测的基础上,瞄准 2030 年前后载人登陆火星,正在进行重型运载,新型能源,进入、下降和着陆技术等多项关键技术攻关和试验验证。其主要目的就是以深空探测活动带动国家经济、技术和社会的发展,充分展示其强大的科技实力和综合国力,续写“阿波罗工程”的辉煌,确保在航天领域的世界领导地位。因此,深空探测可对一个国家产生多方面、多维度、综合性的影响,既是人类未来发展的必然选择,也是未来航天领域发展的重点方向之一。

2.2 遵循由近及远、由易到难的发展规律

纵观各国深空探测发展历程,都经历了由近及远的过程,美、苏早期无人深空探测大致分为 3 个递进阶段:第一步,地月系统探测,以探测月球为主要目标;第二步,近地行星探测,主要探测火星、金星两

颗距离地球最近的类地行星;第三步,其他行星探测,主要针对木星、土星、水星、天王星、海王星、冥王星及其卫星、小行星和彗星的探测,遵循了由近及远的发展规律。

从探测方式来看,人类深空探测也经历了由易及难的过程,逐步发展出了飞越、撞击、环绕、软着陆、巡视、采样返回、载人登陆等多种探测方式。无论是对月球还是对火星、金星等其他天体的探测,基本都是从飞越探测起步,然后环绕,最后着陆甚至取样返回。

目前,已实施的小天体探测任务主要采用飞越和附着两种方式。1991年美国的“伽利略”探测器首次飞越951 Gaspra小行星,从而拉开了小行星飞越探测的序幕,此后又开展了3次典型的飞越探测。对于离地球更远或质量较小的天体,目前基本处于飞越和环绕探测的阶段。比如,由于小天体引力场弱且不规则,容易受太阳光压和太阳系内其他天体摄动的影响,导致其周围动力学十分复杂,使得小天体探测非常困难^[13]。

太阳系的巨行星包括木星、土星、天王星和海王星。人类对其开展的探测主要采用飞越探测,少部分实现了环绕探测。目前,人类对木星进行了5次飞越探测和1次环绕探测。1989年美国发射了“伽利略”(Galileo)轨道探测器,对木星及其卫星的化学成分和物理状态进行了探测,证实了木卫二、木卫三表面覆盖着冰层^[14]。2011年8月又发射了“朱诺号”(Juno)探测器,计划对木星进行环绕探测,目前正在飞行途中。土星是太阳系内第二大行星,1997年美国和欧空局联合发射的“卡西尼/惠更斯”(Cassini/Huygens)探测器首次对土星及其卫星开展了环绕探测。2004年,“卡西尼”与“惠更斯”分离,继续环土星轨道探测,“惠更斯”则成功着陆在土卫六表面^[15]。天王星和海王星目前仅有美国1977年8月发射的“旅行者2号”(Voyager 2)分别于1986年和1989年对其进行了飞越探测。

从未来发展看,深空探测的任务形式将由无人探测向载人探测逐步过渡。但由于载人探测难度很大,迄今也只有美国在20世纪60年代在冷战背景下实现了载人登月,所以在可知的未来,无人探测仍是主要方式。

2.3 月球和火星是探测的重点

月球作为地球的唯一天然卫星,具有可供人类开发和利用的各种独特资源,是人类进入深空的理

想基地和前哨站,因此一直是深空探测的起点和重点。月球既是探测时间最早,也是探测次数最多的,还是唯一进行过载人探测的星体。世界各国已实施119次月球探测任务,占深空探测活动总次数的一半左右。

20世纪50年代末至70年代中期,美国和苏联就竞相开展了大量的月球探测活动。美国1969年7月用“土星5号”(Saturn V)重型运载火箭将“阿波罗11号”(Apollo 11)送上了月球,实现了人类首次登月,此后又成功进行了5次,先后把12名宇航员送上月球,采回了300多千克月壤样品。苏联实现了三次无人月球采样返回,共采回了约370克月壤样品,并将两个月球车送上月球,实现了无人巡视勘察。

自1994年美国发射“克莱门汀”月球探测器以来,标志性成果有欧空局2003年发射的“智慧1号”(Smart-1)月球探测器,验证了太阳能离子推进等新技术^[16];美国2009年发射的“月球侦查轨道器/月坑观测与探测卫星”(LRO/LCROSS),实现了月球周围空间环境测量以及月表形貌与资源分布图测绘,同时采用行星借力飞行技术对月球南极进行了两次撞击,证实了月球水冰的存在^[17]。“LRO探测器”如图7所示;2013年9月美国发射的“月球大气与月尘环境探测器”(LADEE)进行了月球表面大气和尘埃探测,并首次实现了月地激光通信演示验证。

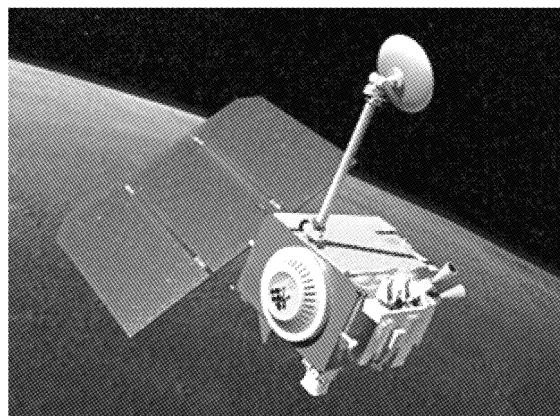


图7 美国“LRO月球探测器”示意图

Fig. 7 Scheme of LRO probe of NASA

中国迄今开展的3次深空探测活动也都是集中在月球。“嫦娥一号”探测器对月球进行了环绕探测。“嫦娥二号”在对月球进行探测后,目前已成为绕太阳飞行的人造小行星^[18]。“嫦娥三号”探测器,实现了月球软着陆和自动巡视勘察。“嫦娥三号”着

陆器和巡视器在月球表面的探测如图 8 和图 9 所示。

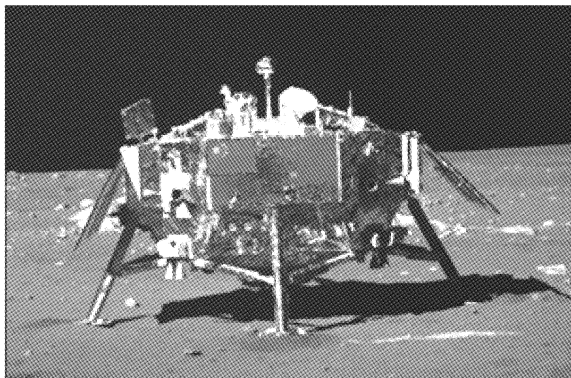


图 8 “嫦娥三号”着陆器安全着陆月面图
Fig. 8 The Lander of CE-3 on the lunar surface

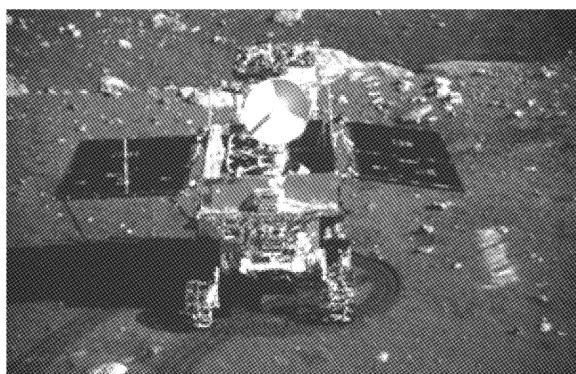


图 9 “嫦娥三号”巡视器月面工作图
Fig. 9 The Rover of CE-3 on the lunar surface

而火星作为类地行星与地球最为相似,可能曾有过能孕育生命的气候条件,也是人类目前探测最为深入的类地行星。截至目前,人类已先后发射 42 颗火星探测器,分别进行了飞越、环绕、着陆和巡视探测,其中 9 次成功(或部分成功)实现了火星软着陆。

人类火星探测历程大致可分为两个阶段,第一阶段是以美国和苏联为主的初期探测,主要采用飞越、环绕和软着陆的方式,其中“海盗 1 号”(Viking 1)和“海盗 2 号”(Viking 2)是此阶段最为成功的例证,其科学目标是研究火星大气和土壤的结构与成分,并搜寻生命迹象^[19]。

20 世纪 90 年代后,以美国为主开展了第二阶段探测任务。此间,美国先后实施了 11 次探测任务,实现了火星表面软着陆和巡视探测。其中,2003 年 6 月发射的“勇气号”(Spirit)和“机遇号”(Opportunity)验证了基于光学图像的自主导航和气囊缓冲着陆技术。两辆火星车对火星地质与气候特征进行了探测,并试图寻找生命存在的证据^[20]。

2007 年 8 月发射的“凤凰号”(Phoenix)首次实现了火星北极软着陆并验证了低成本火星着陆技术,同时在北极地区发现了水冰的存在^[21]。

美国 2012 年 8 月发射了最先进的“火星科学实验室”(Mars Science Laboratory, MSL),成功实现了“好奇号”(Curiosity)着陆火星表面并进行巡视探测。其目的是通过分析土壤及岩芯样本对火星过去和现在可能维持生命的有机化合物及环境进行研究。MSL 有两大特点:一是首次采用了“空中吊车”(Sky Crane)着陆方式,使着陆偏差缩小至 2 km,实现了精确着陆;二是全部采用钚-238 核能源电池,使“好奇号”火星车的承载能力、越障能力和寿命大幅度提高^[22-23]。火星探测器进入大气及各种着陆过程如图 10 所示。

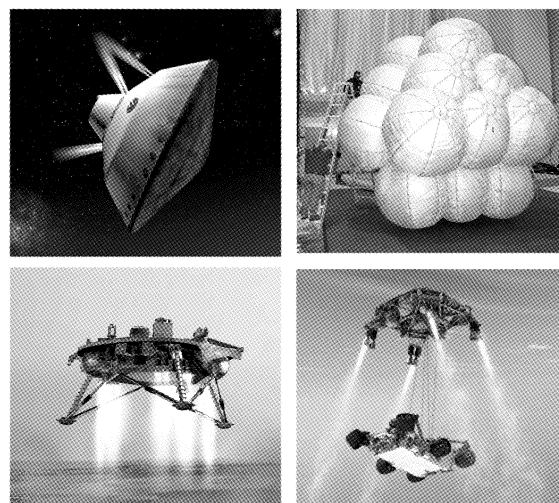


图 10 火星各种着陆过程示意图
Fig. 10 Different landing scheme for Mars landing

从各国的任务规划也可以看出,未来一段时间月球和火星探测仍将是深空探测活动的重点,而近期比较明确的探测任务均为后续月球和火星采样返回、载人登陆乃至基地建设做铺垫。

2.4 技术创新与科学发现双轮驱动

深空探测活动是技术创新和科学发现双轮驱动的结果,几乎每次探测都包含技术创新和科学发现。深空探测涉及各大行星及其卫星、小行星、太阳系空间等诸多天体,科学目标复杂多样,诸如太阳系和地球的起源与演化、寻找地外生命、探测和利用资源、探测空间环境及天体构造和成分等,都是重大科学问题。对这些问题的研究,有助于催生新学科的诞生。技术创新是人类破解科学难题的手段和工具,借助深空探测这一难得的空间技术创新和演示验证

重要平台,开展近地空间和深空所需共性关键技术的演示验证,为提升直接服务于国民经济的应用卫星研制水平和深空探测能力奠定基础。

1998年美国发射的“深空一号”(Deep Space 1)探测器,以技术验证为主,并对小行星和彗星进行了科学探测,其首次验证的离子推进、自主导航等新技术^[24],是未来深空探测关键技术的一个重要发展方向。2003年5月,日本发射的“隼鸟号”(Hayabusa 1)探测器,首次实现了对“丝川”(Itokawa)小行星的附着采样,并于2010年6月成功返回地球。该任务的主要科学目标是通过小天体附着采样,研究小天体和地面获得的陨石样品之间的关系,工程目标是对离子推进、自主光学导航、深空通信、小行星采样与返回等新技术进行试验验证^[25]。“隼鸟号”探测器如图11所示。

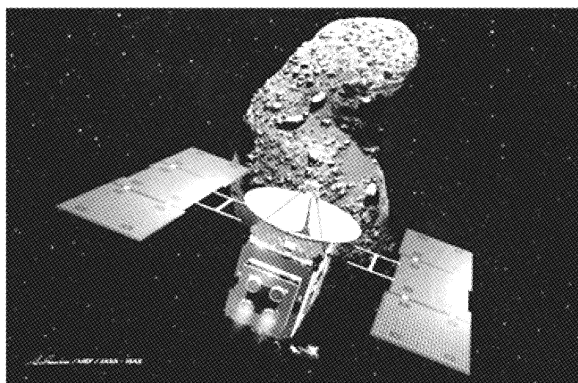


图11 “隼鸟号”探测器示意图
Fig. 11 Scheme of hayabusa probe

中国实施的3次月球探测任务,不仅获取了一批有助于深入认识月球和空间环境的科学成果,而且从工程上突破了一大批航天关键技术。

2.5 深空探测是一项长周期、高风险的航天活动

从深空探测发展历程看,由于距离远、未知因素多、任务周期长、环境复杂,与近地航天活动相比,往往具有更高的风险,迄今已开展的深空探测活动成功次数不足六成。深空探测活动极具战略性和公益性,其主要目的是推动技术进步,促进空间科学发展,更好地造福全人类,而且往往投入较高,因此主要是由国家层面支持和投资,但也不排除未来采用商业模式。

深空探测的对象往往位于广袤无垠的太阳系乃至更远的空间,例如,火星距离地球最远可达4亿千米,飞行时间长达8个月左右。1996年美国发射的“勘察者号”资源探测器,经过9个月才到达火星轨

道,并在轨运行长达10年。木星距地球10亿千米,飞行时间更长,1989年发射的“伽利略号”木星探测器,6年后才到达木星轨道;1975年发射的“旅行者号”探测器,飞行时间更长,迄今已近40年。所以,深空探测活动往往是一项任务周期长,技术难度大的工程。

作为对未知世界的探索活动,深空探测的对象和环境往往具有不确定性,从而导致固有的高风险性。截止到2013年12月,世界共实施深空探测任务242次,其中成功和部分成功的136次,成功率不到六成。正是由于具有任务周期长、风险性高等一系列特点,所以在未来的深空探测活动中,需要系统谋划技术路线,充分识别和化解技术风险,并制定科学合理的任务目标和评价体系。

需要指出的是,在深空探测的早期,由于对地外天体的认识还处于初期,相关技术不成熟,加之美苏是在冷战背景下开展竞赛,深空探测任务主要针对单个目标展开。20世纪70年代以后,为有效提升综合效益、促进新技术发展和最大限度地规避风险,大都在一次任务中对多个天体或对某个天体的多项任务目标进行探测,以及通过多个探测器组合体对不同目标进行探测,这已成为深空探测活动的重要形式之一。例如,“旅行者1号”对木星和土星及其卫星进行了飞越探测,“旅行者2号”对木星、土星、天王星和海王星等多颗巨行星进行了飞越探测,其飞行状态和轨迹分别如图12和图13所示。

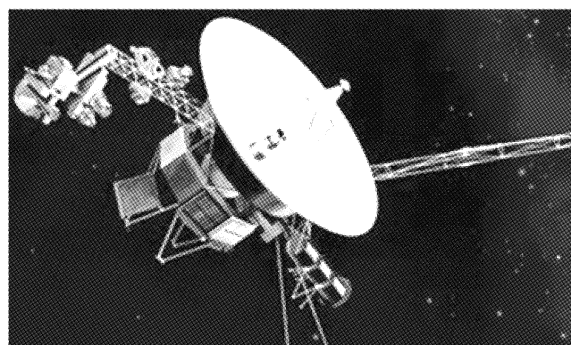


图12 “旅行者”1号和2号飞行状态图
Fig. 12 Flight configuration of Voyager 1 and Voyager 2

3 未来深空探测的主要关键技术

深空探测任务的开展依赖于航天技术的进步和国家综合实力的提高。相对于近地航天任务,深空探测任务面对距离遥远、飞行时间长、数据传输速率有限、深空环境复杂等一系列难题,需要不断地进行

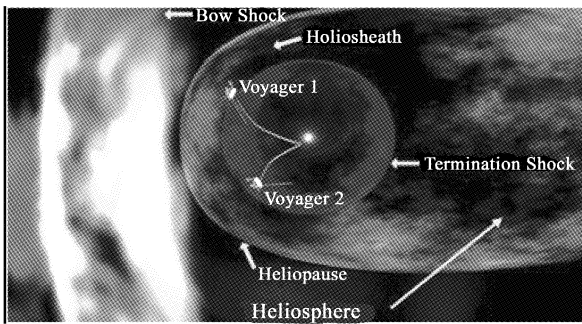


图13 “旅行者”1号和2号飞行轨迹图

Fig. 13 Flight trajectory of Voyager 1 and Voyager 2

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^[26-27]。

3.1 轨道设计与优化技术

轨道设计与优化是航天任务设计中首要而关键的一环。相比近地卫星轨道,深空中繁多而各异的目标天体、多样而复杂的力场环境、丰富而奇妙的运动机理,包括平动点应用、借力飞行和大气减速等,赋予了轨道设计与优化技术新的内涵。迄今为止,深空探测轨道研究已经取得了丰硕的成果,同时也面临着诸多新的问题和挑战^[28]。

3.1.1 多体系统低能量轨道设计与优化技术

天体引力为深空探测提供了丰富的动力资源,合理利用多个天体的引力作用实现探测器的低能量转移是多体系统轨道设计与优化的核心问题^[29]。然而,多体系统中的很多动力学现象和机理尚未认识清楚,限制了此类轨道设计与优化技术的发展。动力学系统理论和大规模数值计算技术是目前解决该问题的常用途径^[30],在三体系统轨道中已得到了广泛应用^[31],但多体系统(特别是日地月系统和木卫系统)轨道仍存在着许多需要解答的问题。

3.1.2 不规则弱引力场轨道设计与优化技术

种类的多样性、形状的不规则和弱引力导致近小天体轨道动力学行为极其复杂,近小天体轨道设计与优化也成为近些年研究的热点问题。对于一些已知信息较多、运动特性简单的小天体(如4769 Castalia等)的研究已取得了一定进展^[32],但在引力场建模、轨道运动性态分析等基础问题方面,并未形成有效的解决途径^[33]。对于双星、三星等复杂小天

体系统附近轨道,更是面临运动稳定性、动力学耦合等亟待开展深入研究的基础性理论难题。

3.1.3 新型推进衍生的轨道设计与优化技术

电推进、核推进及太阳帆等新型推进系统的发展与应用为深空探测器提供了巧妙而高效的转移方式,同时,轨道的非开普勒特性也为设计与优化带来了许多难题。由于飞行时间长,这些新型推进系统衍生的轨道,其动力学非线性强,通常呈多圈螺旋状,脉冲轨道的许多理论方法不再适用^[34]。直接法和间接法是设计此类轨道常用的两类方法^[35],但直接法的最优控制结构、间接法的收敛域等一系列问题仍未得到很好的解决。

此外,小天体探测任务目标选择^[36]、复杂序列借力轨道^[37]等也是未来深空探测轨道设计与优化技术重要的研究方向。随着深空探测技术的深入发展,会不断产生新的轨道设计与优化难题。这些难题的解决不仅依赖于先进数学工具的发展,更有赖于深空轨道本质的动力学行为和机理的认识,这也是深空探测轨道设计与优化技术深入发展的方向。

3.2 自主技术

深空探测器距离地球远、所处环境复杂、任务周期长、与地球通信存在较大时延(例如冥王星探测,信息往返地球超过10h),利用地面测控站进行深空探测器的遥测和遥控已经很难满足探测器操作控制的实时性和安全性要求。深空探测器自主技术即通过在探测器上构建智能自主管理软硬件系统,自主地进行工程任务与科学任务的规划调度、命令执行、星上状态监测与故障时的系统重构,完成无地面操控和无人参与情况下的探测器长时间自主安全运行。为了实现深空探测器在轨自主运行与管理,必须突破自主任务规划、自主导航、自主控制、自主故障处理等关键技术。

3.2.1 自主任务规划技术

深空探测领域复杂的资源约束、时间约束、并发性约束、探测环境的不确定性、星上资源有限等特点给传统的任务自主规划技术提出了新的挑战。深空探测自主任务规划技术重点要解决数值/逻辑混合规划知识建模、规划空间快速搜索、资源的优化和处理、时间约束的处理等问题。

3.2.2 自主导航技术

地面遥测遥控的方式无法满足交会飞越、下降着陆等任务阶段的实时性要求,需要深空探测器具备在轨自主导航能力。深空环境复杂、导航测量信

息缺乏、动力学时变非线性等因素,给自主导航带来了挑战。导航信息获取与目标特征识别、多源信息融合与轨道快速自主估计等是实现深空探测器自主导航急需解决的技术难点。

3.2.3 自主控制技术

深空的特殊环境以及探测任务的要求对探测器自主控制提出了挑战,探测器只有具备自主快速控制能力,才能大幅提高应急水平、操作灵活性和多任务能力,减少对地面的依赖,克服大时延和测控遮挡所带来的影响。考虑深空探测器动力学以及各种约束,快速实现位置信息和姿态信息的解耦,完成多约束条件下的轨道姿态规划、机动与执行,是急需解决的深空探测自主控制关键技术。

3.2.4 自主故障处理技术

利用遥测的航天器信息对星上各系统的运行状况进行判断,诊断航天器的健康状况,并利用航天器冗余和容错技术对出现的故障进行实时处理是目前常用的自主故障处理方法。但对于深空探测任务而言,由于其对可靠性提出更为苛刻的要求,需要探测器能够在轨进行模式识别和故障处置。自主故障处理技术的研究,主要集中在状态实时监测与故障模式识别、在轨故障处置与系统重构等方面。

3.3 新型能源与推进技术

由于大部分探测目标天体距离地球遥远,探测器通常需要消耗巨量的燃料才能实现向目标的转移,而且还可能难以获得足够的太阳能。因此,高效的能源与推进系统是进行深空探测任务的基本保障。核能源具有能量密度高、寿命长的特点,是解决未来深空探测能源问题的一个有效途径。电推进、太阳帆等新型推进技术则是当前解决燃料消耗问题的有效手段。

3.3.1 核能源技术

放射性同位素温差电源(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)具有高可靠性、安全性和长寿命的优点,已在通信卫星及深空探测任务中得到了成功应用^[38-40]。RTG的研制需要解决放射性同位素的选取和制备、温差电源转换及核安全等技术问题。未来一段时间,RTG研究的重点将是大幅度提高热电转换效率和质量比功率。

核推进技术主要分为核电推进和核热推进两类。核电推进采用核电源作为推进系统能源,利用电推进系统产生推力。核电推进具有核能的高能量密度和电推进的高比冲优势,是当前各国的研究重

心^[41]。核热推进是利用核反应产生热能对推进剂加热,使之从喷管高速喷出产生推力,主要存在核燃料高温腐蚀、放射性污染等难点问题^[42]。

3.3.2 电推进技术

电推进技术是利用电能加热或电离推进剂加速喷射而产生推力。根据系统内部的作用方式,电推进器可以分为三类:电热式;静电式;电磁式^[43-45]。为满足深空探测未来应用的需求,电推进系统正在向高功率方向发展,高效大功率电源的研制已成为电推进系统研究的一个重点。另一方面,如何提高电推进系统的使用寿命也是当前电推进研究面临的一个难题。

3.3.3 太阳帆推进技术

太阳帆推进是利用太阳光的光压推动航天器进行宇宙航行的一种推进形式,具有无需消耗燃料和工作介质、飞行速度高的优点。尽管如此,但由于太阳帆的巨大尺寸,使得太阳帆航天器具有巨大的转动惯量,并且其姿态和轨道相互耦合,必须设计高效能、低能耗的姿控系统^[46]。此外,材料与结构方面也存在帆体薄膜的研制、超轻支撑结构和帆体的压缩包装与展开等技术难点^[47]。目前国内外大部分太阳帆研究工作仍集中在理论建模和地面试验阶段。

3.4 测控通信技术

深空测控通信系统是天地信息交互的唯一手段,也是深空探测器正常运行、充分发挥其应用效能不可或缺的重要保证。深空探测器的测控通信面临着由于距离遥远所带来的信号空间衰耗大、传输时间长、传播环境复杂等一系列问题,是深空探测的难点之一。近十余年来,为解决深空探测测控通信时延、深空测角以及测控弧段等问题,世界主要深空测控通信网均在加大深空站天线口径、提高射频频段、探索深空光通信技术等方面进行了大量研究工作^[48]。未来测控通信系统的发展主要体现在以下三个方面。

3.4.1 高频通信技术

为增强深空通信传输效率,通常可采取的有效手段是增加天线口径和提高通信频率。目前,美国70 m口径的深空站主用X频段,34 m口径天线为Ka频段,可实现较高的数据传输速率和测控精度。从近期发展看,深空站传输带宽的提高将首先依赖于射频信号频率的提升,经历S频段到X频段再到Ka频段的发展。然而由于60~70 m大口径天线严重的热变形和负载变形,天线加工和调整精度要求

高,且维护费用昂贵,使得其在 Ka 频段进行通信的难度较大。

3.4.2 天线组阵技术

由于最大天线口径的设计已经接近极限,因此将多个小型天线组成天线组阵,是深空通信技术的发展趋势之一^[49]。天线组阵通过将相距一定距离的独立天线所接受的信号,进行全频谱或载波组合以及基带和复数信号流组合,使得等效接收信噪比大幅提高,由于小型天线可工作在较高的射频频率上,因此也可有效提高数据传输的速率。目前,国际上在天线组阵技术方面已开展多年研究。其中美国计划在 2020 年左右建成由多达 400 个 12 m 口径天线组成的大规模天线阵,最终实现 240 m 的等效天线口径,可获得在 X 频段相当于当前 70 m 口径天线约 120 倍的通信能力。

3.4.3 光通信技术

深空光通信技术是指以激光或空间自由光为载体,通过望远镜进行深空通信的技术。激光的频率比射频信号高 4~5 个数量级,极高的频率使得激光具有更好的方向性和更为丰富的宽带资源^[50],且可在相同数传速率情况下,实现结构质量更轻、投资费用更少。目前,国际对于光通信技术研究还处于实验研究与在轨验证阶段。美国在 2013 年 9 月发射的“月球大气与粉尘环境探测器”(LADEE),对激光通信技术进行了演示验证,实现了月地间 620 MB/s 下行和 20 MB/s 上行的通信速率^[51]。

此外,建立深空测控中继站、构建行星际网络以及采用量子通信技术等也将是未来深空测控发展的方向^[52-53]。

3.5 新型结构与机构技术

深空探测器的结构与机构是承受有效载荷、安装设备和建构探测器主体骨架的基础。深空探测任务目标的多样性与特殊性决定了需要研发新型的结构与机构,尤其是对于在地外天体表面开展探测的巡视航天器。为了完成这一目标,就必须研究适应不同天体与目标要求的新型着陆器结构与机构、巡视器结构与机构、钻取采样结构与机构等技术^[54]。

3.5.1 天体着陆类

着陆器的着陆缓冲机构是探测器实现软着陆的前提和基础。目前已有的着陆缓冲系统类型包括着陆缓冲机构、气囊缓冲装置和空中吊车机构等。其中,软着陆缓冲机构主要由着陆架、缓冲器和展开锁定机构组成,又可分为四腿悬臂式和三腿倒三角式

等类型。这类机构具有结构简单、可靠性高等优点,在美国“勘测者”“阿波罗”、苏联“月球号”以及我国“嫦娥三号”等任务中进行了成功应用。气囊缓冲装置由气体发生器、气囊组件以及缩回与展开机构组成,具有包装体积小、着陆稳定性好等优点,主要在美国“勇气号”和“机遇号”任务中进行了成功应用。空中吊车机构由空中悬吊机和推进系统组成,具有着陆速度低、冲击小、着陆质量大等优点,主要在美国“火星科学实验室”任务中进行了成功应用。为适应未来不同天体着陆探测的需求,这类技术仍是需要深入研究的关键技术。

3.5.2 天体表面巡视类

巡视器携带科学仪器在行星表面移动、完成探测、采样、运输等任务。其结构与机构技术涉及构型设计、总体布局和一体化集成技术。目前,按照移动机构的不同,巡视器有轮式、腿式和履带式等类型。其中,轮式移动机构因具有良好的机动性和行星表面适应性等优点,被广泛采用。由于科学载荷种类多、操作复杂,加之探测目标和天体的多样性,根据不同科学载荷的操作要求,需要研制不同的机构,比如摆杆机构和多臂机构等。

3.5.3 天体钻取采样类

在月球、火星乃至未来其他星体的深空探测任务中,星球表面或表下土壤及岩石样品的采集对于研究星球环境、地质构造、资源以及物质组成等具有重要意义。钻取式自动采样机构相比其他采样机构(挖取式自动采样机构、钳取式自动采样机构、研磨式自动采样机构等),因能够保持所采样品的层理特性而备受关注。

由于深空探测任务的特殊性,采样机构的重量、功耗、构型等指标很大程度上受到探测器系统运载能力的约束。未来钻取式自动采样机构须具有重量轻、能耗低、兼容性好等优点。由于超声波钻头/取心器(USDC)钻取式自动采样机构能够取出岩芯和岩屑,因此随着技术的进步,综合有激光、超声波等轻小型、多杆技术的钻取式自动采样机构将会大幅度提高钻取机构的采样能力和效率,是未来深空采样机构主要发展方向之一。

3.6 新型科学载荷技术

科学有效载荷是直接执行特定航天器任务的仪器设备,直接关系科学探测成果的获取和传输。深空探测目标的多样性决定了需要不同的新型载荷,科学目标的新要求也需要载荷探测精度的提升。

3.6.1 地形地貌与构造探测载荷

视觉是人类获取信息的主要来源,科学家通过形、貌图像能够对所探测的未知天体进行直观的认识,获得未知天体第一印象,因此地形地貌类有效载荷在深空探测中占有重要的地位。

从认识天体的角度看,对地形地貌类有效载荷有两个方面的要求,一是有效载荷有足够大的视场,能从宏观上获取大尺度的图像信息,并解决由此带来的海量数据处理问题;二是有效载荷有足够的细节放大能力,从微观上认识天体。另外,科学探索更希望能够了解天体的内部构造,需要有效载荷能够探测内部结构,并以图像的形式表征。这类载荷重点研究可有效反演内部构造的技术途径。

3.6.2 天体物质成分和资源探测载荷

对组成成分的分析有利于科学家认识被探测对象的本质,而资源是人类活动中最关心的要素,在深空探测中同样重点关注。对天体物质成分和资源进行探测时,可从元素、化合物等多角度揭示。

元素层面的科学探测开展得较多,未来研究的重点在于如何提高探测载荷对元素的探测精度,对微量元素进行识别和检测,兼顾宏观探测和微观探测。另一研究重点是对化合物进行探测的有效载荷。鉴于化合物种类繁多,不仅要关注其化学特性,而且要关注其种类和含量。目前的有效载荷很难兼顾这些需求,需要研究如何提高区分化合物的能力,以及如何适应深空探测的恶劣环境。

3.6.3 空间环境探测载荷

空间环境是影响地球和人类生存的重要因素之一,广义上的宇宙空间环境也是影响宇宙演化的关键因素,探索深空中的空间环境对认识宇宙的起源和演化历史,预测未来发展趋势具有重要意义。

需研究的空间环境包括各种形式的电磁辐射,空间中存在的各种物质和能量粒子,各种磁场和引力场等。空间环境探测的重点在于识别空间存在的物质、辐射和场的时空分布特性,以及相互关系。此类有效载荷的难点,一是被探测的物质和辐射通常具有破坏性,将对载荷的性能和寿命带来影响;二是如何消除探测器本身的干扰,以免影响对某些较弱的电磁场的探测。

3.6.4 生命科学探测载荷

从历史发展和宇宙演化的角度看,地球只能是人类的摇篮,人类要想持续生存和发展,迟早需要走出地球甚至太阳系,开拓更广阔的空间。寻找适合

生命存在和人类生存的场所,是深空探测的主要目标之一。通过对生命演化不同阶段的探测,将有助于科学家解决生命起源的难题。

生命探测是一个十分复杂的过程,既要探测所在星体的基本组成,例如是否存在足够的水,是否存在生命相关的无机小分子物质和有机小分子物质,甚至是大分子有机物,也要探测星体所在的空间环境。因此,这类科学载荷的研究难点在于如何实现对星体组成成分和空间环境的综合探测,以准确识别星体是否具有生命特征。

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50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和科学探测成果。

拓展人类生存发展的空间,寻找地外生命,是人类孜孜不倦的追求,也是人类文明发展的需要。但要实现这一目标需要人类长期而深入地开展深空探测活动,不断深化对太阳系和宇宙的认识。

进入新世纪以来,一些主要航天大国纷纷加入深空探测行列,并相继制定了未来深空探测发展规划,掀起了深空探测活动的又一个高潮。中国的深空探测刚刚起步,虽然取得了一些成绩,但与航天强国相比还有很大差距,未来的探测之路仍然漫长。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,早日启动火星等深空探测活动,为人类文明进步做出更大贡献。

参 考 文 献

- [1] 栾恩杰. 中国空间探索的切入点——“地月日大系统研究”的观念[J]. 航天器工程, 2007, 16(3): 1-8. [Luan E J. Penetration point of China's space exploration—the point of large system of earth-lunar-sun [J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(3): 1-8.]
- [2] Documents of the World Administrative Radio Conference on the use of the geostationary-satellite orbit and the planning of the space services utilizing it (2nd session)[R]. Geneva:1988.
- [3] 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, et al. Engineering and technology of deep space TT&C system [M]. Beijing: Science Press, 2013.]
- [4] Wu W R, Liu W W, Qiao D, et al. Investigation on the

- development of deep space exploration [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2012, 55(4): 1086–1091.
- [5] Nozette S, Lichtenberg C L, Spudis P, et al. The clementine bistatic radar experiment [J]. *Science*, 1994, 274: 1495–1498.
- [6] Guo Y P. Solar Probe Plus: mission design challenges and trades [J]. *Acta Astronautica*, 2010, 67: 1063–1072.
- [7] 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 Science*, 2006, 8(10): 31–36.]
- [8] Gardini B, Zelenyi L, Khartov V, et al. ESA-ROSCOSMOS strategy for Moon exploration [C]. 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy, 1–5 October, 2012.
- [9] Perino M A, Fenoglio F, Pelle S, et al. Outlook of possible european contributions to future exploration scenarios and architectures[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 88:25–34.
- [10] Matsumoto K, Kamimori N, Takizawa Y, et al. Japanese lunar exploration long-term plan[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59: 68–76.
- [11] Hashimoto T, Hoshino T, Tanaka S, et al. Study status of Japanese Moon lander SELENE-2 in 2012 [C]. 63rd International Astronautical Congress, Naples, Italy, 1–5 October, 2012.
- [12] Yoshikawa M, Yano H, Kawaguchi J. Japan's future plans for missions to primitive bodies: Hayabusa-2, Hayabusa-Mk2, and Marco Polo[C]. 39th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, USA, 10–14 March, 2008.
- [13] Scheeres D J. Orbital mechanics about small bodies[J]. *Acta Astronautica*, 2012, 72: 1–14.
- [14] Johnson T V, Yeates C M, Young R. Space science reviews volume on galileo mission overview[J]. *Space Science Reviews*, 1992, 60: 3–21.
- [15] Matson D L, Spilker L J, Lebreton J P. The Cassini/Huygens mission to the saturnian system[J]. *Space Science Reviews*, 2002, 104: 1–58.
- [16] Foing B H, Racca G D, Marini A, et al. Smart-1 mission to the Moon: status, first results and goals[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 6–13.
- [17] Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, 330: 463–468.
- [18] 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. [Ye P J, Huang J C, Zhang Y X, et al. The achievements of Chang'e-2 satellite technology and the prospects of China's deep space exploration [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2013, 43(5): 467–477.]
- [19] Soffen G A, Young A T. The viking missions to Mars[J]. *Icarus*, 1972, 16(1): 1–16.
- [20] Crisp J A, Adler M, Matijevic J R, et al. Mars exploration rover mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2003, 108(E12): 8061.
- [21] Smith P H, Tamppari L K, Arvidson R E, et al. H₂O at the phoenix landing site[J]. *Science*, 2009, 325: 58–61.
- [22] Grotziinger J P, Crisp J, Vasavada A R, et al. Mars science laboratory mission and science investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170: 5–56.
- [23] 崔平远, 于正湜, 朱圣英. 火星进入段自主导航技术研究现状与展望[J]. *宇航学报*, 2013, 34(4): 447–456. [Cui P Y, Yu Z S, Zhu S Y. Research progress and prospect of autonomous navigation techniques for Mars entry phase [J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(4): 447–456.]
- [24] Rayman M D, Varghese P, Lehman D H, et al. Results from the deep space 1 technology validation mission [J]. *Acta Astronautica*, 2000, 47(2): 475–487.
- [25] Kawaguchi J, Fujiwara A, Uesugi T. Hayabusa—its technology and science accomplishment summary and Hayabusa-2[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 62(10): 639–647.
- [26] NASA space technology roadmaps and priorities[EB/OL]. [2013–06–05]. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13354.
- [27] Craig P, Tibor B, Andrea B, et al. Overview of high priority technologies for solar system exploration [C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 3–10 March, 2007.
- [28] 崔平远, 乔栋, 崔祐涛. 深空探测轨道设计与优化[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [Cui P Y, Qiao D, Cui H T. Orbit optimization and design for deep space exploration[M]. Beijing: Science Press, 2013.]
- [29] Davis D C, Howell K C. Characterization of trajectories near the smaller primary in the restricted problem for applications [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2012, 35(1): 116–128.
- [30] Koon W S, Lo M W, Marsden J E, et al. Dynamical systems, the three-body problem and space mission design [M]. Springer, Berlin, 2007.
- [31] Wang S, Shang H B, Wu W R. Interplanetary transfers employing invariant manifolds and gravity assist between periodic orbits[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*. 2013, 56(3): 786–794.
- [32] Scheeres D J, Ostro S J, Hudson R S, et al. Orbits close to asteroid 4769 castalia[J]. *Icarus*, 1996, 121: 67–87.
- [33] Wall J B, Conway B A. Shape-based approach to low-thrust rendezvous trajectory design[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, 32(1): 95–101.
- [34] Betts J T. Survey of numerical methods for trajectory optimization [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, 21(2): 193–207.
- [35] Cui P Y, Qiao D, Cui H T, et al. Target selection and transfer trajectories design for exploring asteroid mission[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*. 2010, 53(4): 1150–1158.
- [36] 尚海滨, 崔平远, 徐瑞, 等. 结合行星借力飞行技术的小推力

- 转移轨道初始设计[J]. 宇航学报, 2011, 32(1): 29-38. [Shang H B, Cui P Y, Xu R, et al. Preliminary design of low-thrust transfer trajectory with planetary swing-bys[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(1): 29-38.]
- [37] Sheikh S, Pines D, Wood K, et al. Spacecraft navigation using X-ray pulsars[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(1): 49-63.
- [38] George R S, Thomas J S, Leonard A D. Radioisotope power: a key technology for deep space exploration[M]. Radioisotopes-Applications in Physical Sciences, Prof. Nirmal Singh(Ed.), InTech, 2011.
- [39] 张建中, 任保国, 王泽深, 等. 放射性同位素温差发电器在深空探测中的应用[J]. 宇航学报, 2008, 3: 644-647. [Zhang J Z, Ren B G, Wang Z S, et al. Radioisotope thermoelectric generators in deep space exploration[J]. Journal of Astronautics, 2008, 3: 644-647.]
- [40] 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. Applications of RHU/RTG in space missions[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(2): 1-6.]
- [41] Hack K J, George J A, Riehl J P, et al. Evolutionary use of nuclear electric propulsion[R]. AIAA-1990-3821, 1990.
- [42] Nakagawa R Y, Grayson S. Concept for a shuttle-tended reusable interplanetary transport vehicle using nuclear electric propulsion[R]. NASA TM 2006-0030353, 2006.
- [43] Zafran S, Murch C, Grabbi R. Flight applications of high performance electrothermal thrusters[C]. AIAA/SAE 13th Propulsion Conference, Orlando, Florida, July, 1977.
- [44] Kaufman R, Reader P D. Electrostatic thrusters[C]. AIAA/SAE 8th Joint Propulsion Specialist Conference, New Orleans, Louisiana, 1972.
- [45] Kolm H H. Electromagnetic accelerators[C]. Space Manufacturing 4, Proceedings of the Fifth Conference, Princeton, 1981.
- [46] 龚胜平. 太阳帆航天器动力学与控制研究[D]. 清华大学, 2009. [Gong S P. Study of dynamics and control of sail-craft[D]. Tsinghua University, 2009.]
- [47] 陈健, 曹永, 陈君. 太阳帆推进技术研究现状及其关键技术[J]. 火箭推进, 2006, 32(5): 37-42. [Chen J, Cao Y, Chen J. Current status of solar sail propulsion and analysis of its key techniques[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(5): 37-42.]
- [48] 张乃通, 李晖, 张钦宇. 深空探测通信技术发展趋势及思考[J]. 宇航学报, 2007, 4: 786-793. [Zhang N T, Li H, Zhang Q Y. Thought and developing trend in deep space exploration and communication[J]. Journal of Astronautics, 2007, 4: 786-793.]
- [49] 姚飞, 匡麟玲, 詹亚峰, 等. 深空天线组阵关键技术及其发展趋势[J]. 宇航学报, 2010, 31(10): 2231-2238. [Yao F, Kuang L L, Zhan Y F, et al. Key techniques and development trend of antenna arraying for deep space communication[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(10): 2231-2238.]
- [50] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[C]. SPIE 8971, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, 89710S, San Francisco, California, USA, 6 March, 2014.
- [51] 张靓, 郭丽红, 刘向南, 等. 空间激光通信技术最新进展与趋势[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(4): 286-293. [Zhang L, Guo L H, Liu X N, et al. Latest progress and trends of development of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(4): 286-293.]
- [52] Mukherjee J, Ramamurthy B. Communication technologies and architectures for space network and interplanetary internet[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 881-897.
- [53] 吴华, 王向斌, 潘建伟. 量子通信现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(3): 296-311. [Wu H, Wang X B, Pan J W. Quantum communication: status and prospects[J]. SCIENCE CHINA: Information Science, 2014, 44(3): 296-311.]
- [54] 于登云, 杨建中. 航天器机构技术[M]. 北京: 中国科学出版社, 2011. [Yu D Y, Yang J Z. The spacecraft mechanism technology[M]. Beijing: Science Press, 2011.]

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,中国探月工程总设计师,研究方向为航天测控通信与航天系统总体设计。

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:wuwri2002@vip.sina.com.cn

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。主要研究方向为航天器动力学与总体设计技术。本文通信作者。

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:宋宏)