深空探测发展战略研究

刘继忠¹, 胡朝斌¹, 庞涪川^{1*}, 康焱¹, 李晖², 马继楠³, 陆希⁴

1. 国家航天局探月与航天工程中心, 北京 100190;

2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

3. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

4. 上海航天技术研究院, 上海 201109

* E-mail: pangfc@163.com

收稿日期: 2020-05-21; 接受日期: 2020-07-16; 网络版发表日期: 2020-09-11

国家航天局民用航天预研项目资助

摘要 本文在综述国际深空探测的发展历程、发展现状和主要趋势的基础上, 结合深空探测长期可持续发展的要求, 阐述了月球探测、行星探测和太阳探测三大重点领域的11类热点科学目标与3类科学应用问题, 给出了深空探测工程体系应构建的8类主要能力, 提出了深空探测总体发展目标, 以及任务分级模式、11项探测重点任务设想, 分析了国际合作方向及重点, 可为深空探测的后续规划和未来发展提供参考。

关键词 深空探测, 月球探测, 科学应用, 工程体系, 国际合作

1 引言

深空探测是指发射航天器, 在等于或大于地月距离的宇宙空间, 对地外天体、太阳系空间和宇宙空间进行探测的活动^[1], 包括月球、行星系统、小天体、太阳及日球层以远等主要方向。深空探测是当今世界航天活动的重要领域, 可获得新知识、新发现, 推动对太阳系及宇宙起源、行星物质起源、生命起源与演化规律等研究, 进一步认识地球环境的形成和演变, 认识空间和地球自然系统之间的关系, 是科学研究、技术创新和空间资源开发与利用的重要途径^[2]。本文研究成果可为深空探测未来5~15年的规划和发展提供参考。

2 深空探测发展概况

2.1 国际深空探测发展历程

人类深空探测活动始于20世纪60年代。截至2020年4月, 美国、俄罗斯/苏联、中国、日本、印度、欧洲等国家和地区先后实施了240余次深空探测活动, 具体见表1, 实现对月球、七大行星、小行星、彗星、冥王星、太阳等的探测并进入临近恒星际空间, 实现载人登月, 实现月球、火星、金星、小行星和彗星表面软着陆, 实现月球和小行星采样返回, 实现月球和火星表面的着陆与巡视勘察。回顾深空探测发展历程, 大致可分为以下三个阶段。

第一阶段, 1958~1976年, 美国、苏联两国在航天领域展开激烈竞争, 密集地向深空发射探测器, 美国实

引用格式: 刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1126–1139

Liu J Z, Hu C B, Pang F C, et al. Strategy of deep space exploration (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 1126–1139, doi: 10.1360/SST-2020-0207

表 1 国际深空探测任务情况^{a)}

Table 1 Statistical status of deep space exploration missions in countries around the world

项目	美国	俄罗斯 (含苏联时期)	欧洲航天局 (欧空局)	中国	日本	德国	印度	以色列	合计
月球	46/33	60/22	1/1	5/5	2/2	—	2/1	1/0	117/64
火星	21/15	19/5 ^①	2/2 ^②	—	1/0	—	1/1	—	43/23
金星	6/5	33/16	1/1	—	1/0	—	—	—	41/22
水星	2/2	—	1/1	—	—	—	—	—	3/3
巨行星	7/6	—	—	—	—	—	—	—	7/6
小行星、彗星、矮行星	7/5	—	2/2	—	5/3	—	—	—	14/10
太阳	13/10	—	2/2	—	—	2/2	—	—	17/14
深空探测器	102/76	112/43	9/9	5/5	9/5	2/2	3/2	1/0	242/142

a) 截至2020年3月30日, 斜杠后的数字为任务成功的次数; 火星生物学-2016(ExoMars)为欧洲和俄罗斯共同开展的联合任务, ①②分别进行了统计。

现了载人登月^[3]。

第二阶段, 1976~1990年, 国际深空探测活动的“平静期”。世界航天大国发展重点转向空间站、航天飞机等载人航天项目, 美国实现了地球以外全部7大行星的探测^[4]。

第三阶段, 1990年至今, 以科学探索为主要驱动力, 主要航天国家和组织纷纷制订目标宏伟、各具特色的深空探测计划并持续开展。在竞争中谋求合作, 次数少效果好, 保持了很高的成功率, 获得了大量的新发现。美国实现对冥王星的飞掠探测, 并进入临近恒星际空间^[4]。

这些探测活动, 实现对月球、七大行星和部分小天体、太阳等的探测, 并实现月球及小行星的采样返回, 人类探测器的轨迹已经延伸至临近恒星际空间, 并正在向更遥远的恒星际空间挺进。

2.2 国际深空探测的主要成就

美国在深空探测活动中处于领先地位, 是目前唯一实施太阳和七大行星探测、载人登月、进入临近恒星际空间的国家, 取得的科学成果丰富, 总体能力国际领先。苏联曾创造首次月球探测、首次金星探测等多个深空探测的“人类首次”, 获得大量科学探测数据, 具有较强的技术能力^[5~7]。

中国起步晚但起点高, 五战五捷、成果显著。嫦娥一号获取120 m分辨率全月图, 嫦娥二号获取7 m分辨率全月图并对图塔蒂斯小行星进行飞掠探测, 嫦娥

三号实现月面软着陆和月面巡视探测, 嫦娥五号飞行试验器突破月地高速再入返回技术, 嫦娥四号实现首次着陆于月球背面并巡视勘察(图1)^[3,8]。

欧空局通过与美国及俄罗斯合作, 开展了多次高水平深空探测任务, 科学载荷研制能力处于国际领先, 并通过多项科学载荷国际合作获得了丰富的探测数据与科学成果。日本在小天体探测方面处于国际领先。印度实现亚洲首次火星环绕探测任务。

2.3 当前深空探测发展的主要特点

(1) 探测对象与方式多元化

探测内容从早期的天体环境和地形地貌探测、物质成分探测, 逐步发展到对天体内部结构、物质和生命起源等探测。探测对象从早期的单一目标探测, 逐步发展到对太阳系多天体和行星际空间的多任务综合性探测^[9]。探测距离从月球附近到太阳系内的行星, 最后逐步拓展至日球层边缘的临近恒星际空间。探测方式亦由飞越探测或环绕探测等为主, 演变为飞越、环绕、软着陆与巡视、无人取样返回、行星往返运输及载人登陆等多种方式交叉进行。

(2) 系统构建工程技术体系

未来的探测任务具有一次任务实现多目标、多天体、多探测形式等特点^[2], 技术难度大、实施风险高, 特别是天体的相互位置导致发射窗口受限, 为确保整个项目的研制进度和控制任务成本, 须根据深空探测的整体目标、任务规划等, 提前布局并先期启动空间

图1 嫦娥四号探测器月球工作图

Figure 1 Work diagram of Chang'e-4 probe on lunar surface.

到达能力、先进探测能力、新型能源与推进等关键技术攻关及核心能力建设, 确保突破深空探测任务所需的新能力、新系统和新方法。

(3) 原位探测及资源应用

基于对更加深远空间的探测、停留时间更长、降低航天器规模、综合效益驱使等方面原因, 对地外天体原位探测分析并进行资源开发应用已成为重点^[10]。对挥发分和水等资源的勘察与提取, 为航天器进行燃料补给、航天员生保物资补充等; 3D打印、建筑材料制备等, 为未来的月球/火星科研站的建设提供支撑^[11]。

(4) 国际合作更加广泛

深空探测是人类共同的事业, 耗资大、任务复杂, 各国关注度高, 广泛的国际合作是必然趋势, 也利于推动人类共同发展。如1997年发射的卡西尼-惠更斯土星系统探测器, 是由美国、欧空局、意大利空间局等联合开展的^[12]; 欧洲金星探测计划, 由欧空局、俄罗斯、美国、日本和加拿大联合开展; 中国嫦娥工程在测控通信、载荷研制、数据联合研究等方面, 与欧空局、德国、荷兰、瑞典等开展了有效合作^[13]。

(5) 国际空间法律法规的博弈不断加大

国内法方面, 伴随着技术的进步, 深空资源的开发利用将逐渐成为现实, 美国、卢森堡等国家积极制定国家行星资源开发等法律, 为其航天提供稳定和持续的法律支持^[14]。国际法方面, 相关国家在推动深空探测快速发展的同时, 积极研究国际法体系在空间资源开采利用方面所面临的挑战、对空间资源开采的国际协调机制和国际政策等内容, 借助多边平台积极参与

国际外空法律事务, 推动国际深空探测法律法规的研究和制订。

2.4 未来深空探测发展的研判

从世界主要航天国家和组织发布的深空探测发展路线来看, 深空探测有以下特点: 一是作为国家战略的重要组成部分, 各国均在较长的时间跨度上统筹规划、合理安排并保持稳定投入; 二是以月球为首选, 积极构建能力体系、突破关键技术, 不断向火星等更加深远空间迈进; 三是伴随技术的进步, 人类探索未知、到达更远目标的渴望和可行性随之加强, 利用太空、服务国家安全发展的需求更为迫切; 四是机器人与载人任务协调发展是大趋势。

2035年前, 世界深空探测领域基本格局稳定, 美国处于领先和领导地位, 中国积极扩大在月球、小行星和行星探测等领域的影响, 俄罗斯、日本、印度、欧盟等国家和组织依据各自发展目标, 有重点地开展深空探测活动, 国际合作的力度越来越大, 阿联酋、以色列等新兴航天国家参与度逐渐提高, 并将有更多的国家或组织开展或参与深空探测活动。

3 深空探测热点科学与应用问题

围绕在地外资源勘察利用、太阳系起源与生命探寻、空间物质与能量研究等热点科学问题, 深空探测重点集中在月球探测、行星探测和太阳探测三大方向。月球探测方面, 月球极区挥发分和水冰的提取与利用试验是应用研究的重点^[15]; 行星探测方面, 物质探

测、生命信息探寻等是重点^[16]; 太阳探测方面, 太阳活动周、太阳爆发活动、太阳风的传播演化、太阳风与星际风的物质与能量交换机理、空间环境的形成与演化等是重点^[17].

3.1 月球极区科学探测与挥发分等资源勘察

月球极区具有地形地貌崎岖复杂等特点, 其中月球极区的月坑永久阴影区因含有水冰和挥发分是热点探测区域, 利用智能机器人开展科学探测与技术验证, 探测月壤中挥发分和水冰组成的存在及来源, 并开展月球资源原位利用技术验证, 为后续太空资源规模利用打下基础.

(1) 挥发分和水冰等月球资源勘察

探测月壤水冰和挥发性组分, 确定极区永久阴影区水冰的存在及来源, 如图2揭示其在月球形成和演化过程中的形成机制和存在状态. 开展月壤稀有气体就位提取试验以及矿物组分就位分析, 为月球潜在资源勘察利用提供技术支持.

(2) 月球样品及着陆区环境研究

在地面实验室对月球样品进行系统、长期的研究, 分析月壤的结构、物理特性、物质组成, 深化月球组分和演化历史的研究. 开展着陆点区域形貌探测和地质背景勘察, 获取与月球样品相关的现场分析数据, 建立原位探测与实验室分析的关联模型. 对着陆区的长期持续观察, 获得更加精准的探测月面热环境、辐射特性、地质特征、尘埃环境等数据.

(3) 智能机器人月球极区科学探测与技术验证

利用智能机器人探测月球深部物质组成, 可以揭示月球岩浆洋的分异结晶过程, 以及月球南极-艾特肯盆地、高地斜长岩、克里普岩三类地体的差异和成因. 测定月球南极-艾特肯盆地的撞击年龄, 揭示月球早期撞击历史. 获取月球南极的表面物理参数, 为长期运行的月球科研基础设施提供环境数据. 开展月面生态系统科学试验, 探索月壤生物培植, 揭示物质循环和能量流动特征.

(4) 载人月球科学探测与技术验证

研究月球环境对人类身体健康、心理健康、活动能力的影响, 更好地理解宇航员月面工作环境. 突破月

图2 月球南极卡贝乌斯坑附近潜在水冰分布图^[18]

Figure 2 Distribution map of potential water ice near the Cabeis crater on the South Pole of the Moon ^[18].

面辐射防护、尘埃减缓、微陨石撞击保护等技术,保障宇航员在月面的安全。突破闭合再生环控生保技术、月面原位资源利用技术,满足宇航员在月面的生命支持和居住需求,最大限度减少对地球资源的依赖。

3.2 火星等典型天体及物质成分的科学探测

行星及其卫星、矮行星、小天体及行星际物质等共性与特性及其演化的探测与研究是揭开太阳系起源和演化最为直接的证据。火星、木卫二、小行星、彗星、金星等可能存在的生命信息及其生存环境探测是研究生命起源的重要内容^[19]。火星等环境的研究为探寻古老生命信息等提供科学依据。

(1) 火星环境探测及生命探寻

探测火星土壤的成分、结构与分布,研究火星土壤特性和物质组成,如图3。探测火星电离层、中性大气等,以及火星表面的气象观测,研究火星大气组成与结构、太阳辐射与火星大气和物理场的相互作用、火星表面的气候特征。探测火星表面水冰及其存在信息、气候环境、地形地貌特征,火星内部结构,确定火星表面水冰的存在和分布,探索火星生命信息并研究长期居留的可能性。

(2) 太阳系起源及生命起源

通过对太阳系各层次天体的探测,探寻太阳系早期的演化历史,包括行星的形成和演化过程、太阳系早期撞击体大小和通量及其随时间的变化等。研究地球以外天体是否有适合生命存在的环境,哪些因素对生命起源起决定性作用,太阳系中生命如何演化,生命怎样随行星环境变化而改变,彗星和小行星与地球生命起源的关系,木星和土星的卫星是否具有生命存

图3 天问一号火星车工作示意图
Figure 3 Schematic diagram of Tianwen-1 rover.

在的条件等,是深空探测研究生命及相关物质起源和演化的主要问题。

(3) 比较行星学研究

比较行星学是将地球置于太阳系的时空尺度,对比研究各天体的共性与特性,综合分析研究太阳系的形成与演化规律,包括行星大气层的形成与演化过程的比较研究,金星等类地行星形貌与地质构造的比较研究,物质组成及其分布特征的比较研究,内部结构与物理场的比较研究等,行星演化的时间序列研究。通过比较行星学综合研究,积极构建和完善类地行星和太阳系形成与演化理论模型。

3.3 太阳活动及其物质和能量输运

对极远、极暗、极寒的日球层顶进行探测,对内日球层进行多角度观测,并近距离对太阳进行探测,可实现四维太阳系体系构建、太阳起源和演化等科学问题的重大突破^[20]。太阳剧烈活动的探测与研究是减缓地球和人类生存环境受到灾害性影响的必要手段。

(1) 星际侵入物质的空间分布特性

太阳风的拾起过程则被认为是引起加热的主要原因之一,对拾起粒子的径向分布和效应的深入观测和研究,对于理解太阳风的动力学演化非常重要。通过银河宇宙线和异常宇宙线各向异性的就位观测,可有效揭示日球层可能的调制及作用大小,实现宇宙线粒子数据反演理论和方法的研究。

(2) 日球层顶的结构和特性

现有理论认为超声速太阳风在通过终止激波后将变为亚声速,通过对拾起粒子的就位探测可揭示终止激波的真实特性。终止激波在很长一段时间内都被认为是异常宇宙线获得加速的源区,但旅行者号的观测显示鞘区可能是异常宇宙线的源区,需开展就位观测以确认异常宇宙线的产生机制和具体源区^[17]。星际介质中的中性原子和宇宙尘埃可以不受太阳磁场的影响,并聚集在日球层尾部,通过对日球层尾部的探测,可以了解中性原子和尘埃的引力聚焦分布,考察其对太阳风动力学过程的影响,如图4。

(3) 太阳精细结构与磁场起源和能量释放机制

通过直接探测电流片的精细结构和内部物理过程,研究太阳磁场重联模型,为已有的磁场重联经典理论带来全新内容和视野。确定太阳风源区等离子体和磁场的结构与动力学特征,研究太阳风源区域的磁场

图 4 日球层顶结构示意图(背景图源自ESA网站)

Figure 4 Schematic diagram of the structure of the heliosphere (background image is from ESA).

与光球层和太阳风间的关系。以高空间分辨率观测太阳大气中的精细结构和相应的物理过程,跟踪加热日冕和加速太阳风的能量流,研究能量如何从低层太阳大气传递到日冕以及太阳风中,研究太阳风速度不均匀的根源,以及加速和传输高能粒子的机制。

(4) 太阳活动对空间环境的影响

太阳活动对地球和行星际空间环境产生巨大影响。通过对小尺度结构进行高时空分辨率的观测和研究,了解太阳活动的内在本质。对大尺度结构与演化特征进行观测和研究,了解太阳活动的总体规律。开展对近日空间和太阳极区大尺度、全时域、高分辨、高精度四维立体多波段探测,实现太阳高纬的就位探测及临近恒星际物质特性探测,实现宇宙线在日球层的全日球循环机理、日球层的外部宇宙物质作用机理等研究,认识和理解太阳磁场基本结构、太阳电磁风暴的起因、太阳活动周期形成机制等,以及太阳活动对空间环境的灾害性影响。

3.4 空间应用领域

空间应用是指利用空间科学、空间技术及其所开发的资源,包括物质资源、位置资源、环境资源等,在科学研究、人类经济、社会发展等领域的各种应用的总称。

(1) 空间技术应用

通过空间活动,牵引带动能源技术、通信技术、制导导航技术、材料技术等空间技术的发展,并引领科学研究、人类经济、人类社会的发展。通过空间堆

电源的研究与应用,推动地面/海洋小型核反应堆热/电源的发展。3D打印技术可应用于其他工业领域高性能、复杂构型产品的研制生产,以及野外作业设施设备快速维护维修等。微小型低功耗高灵敏科学载荷技术可应用于国民经济其他领域各种检测设备。

(2) 空间科学应用

通过空间科学研究,进一步增进了对宇宙、生命和物质的起源与演化的认知,促进了稀有矿物、电源等资源的发现和利用,带动交叉学科、边缘学科的发展,科学知识的普及推动了人类社会的发展。比较行星学的发展,有助于更好理解地球家园,为能源与矿业、自然灾害预警等提供支持。生命起源与演化、航天员生命保障系统等研究可加深对人类起源与演化的理解,更好治疗和预防疾病。

(3) 空间资源应用

在空间物质资源利用方面,通过氧资源、水资源的提取与利用试验,开展月表消耗品获取与利用技术研究。通过月壤3D打印、月壤建筑材料制备试验,开展月表原位制造技术研究。

在空间位置资源利用方面,针对深空探测任务中空间位置资源的重要性,充分利用日-地-月三者位置关系,开展基于月球平台的天文和空间物理观测等研究,推动空间物理、空间天文、地球物理和空间信息技术等发展。

在空间环境资源利用方面,利用宇宙空间的特殊环境,研究空间活动、空间磁场、空间大气环境下的生物特性及材料制备。以空间原位资源利用为基础,进行能源储能试验研究。利用月球、火星等环境,开展空间生命科学前沿探索与生态保障系统研究,掌握空间生物效应的生物力学-化学耦合关系和空间环境的微型生物圈构建技术。

4 深空探测的工程技术体系

深空探测任务系统复杂、实施难度大,涉及多个专业技术领域和学科,且面临低温、强弱磁、强辐射等恶劣未知环境,应系统构建相应工程技术体系并突破相关关键技术。工程总体技术能力、智能航行能力、深空测控通信能力、空间智能操作能力、深空能源供给能力、进入与返回能力、大数据处理能力和先进探测能力等八方面内容组成了深空探测工程技术

体系。

工程总体技术能力。突破多天体建模、多源数据分析及特征提取、复杂天体环境的动力学问题、多天体借力模型、多天体借力轨道设计、飞行轨迹自主规划、系统综合集成仿真、机器人自组网等关键技术,形成深空探测的规划论证与总体技术能力、在轨支持与决策支撑能力、科学数据/样品管理与应用服务能力,有效开展规划论证及总体方案优化、探测任务规划、技术状态与风险控制、探测运行重大问题决策与快速响应、科学数据管理与服务等^[21],如图5。

智能航行能力。突破基于星座的深空导航、星际自主导航、智能故障诊断及恢复、多目标识别及规避、火星表面高精度自主起飞、远距离非合作目标高精度交汇及高精度着陆、多目标多约束自主轨迹生成、强磁场/辐射/高温保护、月球/火星表面飞行机器人等关键技术,有效支持深远太空长飞行时间大延时下小行星探测与采样返回、木星系探测与行星穿越、太阳抵近探测等任务^[22]。

深空测控通信能力。突破深空复杂通信理论问题、远距离高码速率及大容量通信、光通信技术及实现、大口径天线组阵、木星以远高精度快速测定轨、大功率长寿命行波管、Ka频段大口径折叠天线、天地联合测控通信等关键技术,解决深空探测因距离遥远所带来的信号衰减大、时延长等问题,支持载人月球/火星探测超大数据交互、多任务并行实时通信、火星以远深空探测等任务^[23,24]。

空间智能操作能力。突破空间挥发分与水冰等资源提取制备、月壤/火壤原位成型、月球与火星表面宜居环境新材料及建造、月面环境生物植物培育、不同功能复杂环境的智能机器人、空间设备维护维修、

图5 工程总体技术能力体系示意图

Figure 5 Schematic diagram of the overall technical capability system of the project.

月面挖掘及建筑技术、特殊材料制备等关键技术,具备无人值守地外天体资源的采集利用、空间设施建设、空间设施设备故障实时诊断和故障容错与重构能力,有效支持月球/火星长期科研站等任务^[25~27]。

深空能源供给能力。突破大功率轻质太阳阵列、全光谱高效率光伏电源、高效率同位素电源、光电与热电高效率转换^[28]、空间堆电源(如图6)、无线能量传输、轻质大容量储能、深空高比冲推进、高温差火星表面动力、大功率电推进、深空太阳帆/磁帆推进、核热推进、新型空间环境推进等关键技术,具备高效率太阳能利用、非太阳能能源应用、新型高效空间推进等能力,有效支持火星采样返回、100 AU以远太阳系边缘探测、月球/火星科研站等任务。

进入与返回能力。突破长时/复杂环境氢氧基动力、长时/复杂环境甲烷氧基动力、弱引力天体取样及智能控制、轻小型超高速再入返回、地月/地火往返重复使用运输、高效率制动、大运载能力(地月转移轨道运载能力50吨以上)设计等关键技术^[29,30],具备大质量航天器地外天体软着陆能力、月球/火星等轨道航天器交会能力、第二宇宙速度再入返回能力等,有效支持火星取样返回、载人月球/火星探测等任务。

大数据处理能力。突破高精度天体数据库、面向大数据的智能化识别分析、高精度精细特征提取及描述、多源数据深度挖掘、多学科探测融合分析、新型数据分析算法理论等关键技术,具备多目标多天体联合探测任务规划能力、基于多种不同格式与来源的工程模型总体设计能力、多探测任务联合操作能力、多源数据联合分析与研究能力。

先进探测能力。突破宇宙起源与演化理论、空间/天体环境探测、空间/天体物质探测、空间/天体结构探测、空间极暗目标探测、空间射线探测、生命痕迹探测等关键技术^[31],如图7,不断提升对空间环境的电磁辐射、物质与能量粒子、电磁场和引力场的探测范围和探测精度,降低载荷的功耗、体积和重量,实现引力场、电磁场、粒子、能量、光谱、成分等精准探测。

5 深空探测未来任务研究

5.1 总体发展目标

围绕太阳系起源与生命探寻、地外资源勘察利

图 6 10 kW热管快堆+温差发电空间堆电源示意图
Figure 6 Schematic diagram of 10 kW heat pipe fast reactor + power supply of thermoelectric generation space reactor.

图 7 日球层探测科学目标与载荷配置关联图
Figure 7 Correlation diagram of scientific objective and payload configuration of heliospheric exploration.

用、空间物质与能量研究等空间科学及应用问题，以建成国际月球/火星科研站、航天器太阳系内到达并开展精准探测为目标，以月球探测、行星探测和太阳探测为重点，建立大中型任务与小型灵活任务相结合的常态化模式，统筹不同月球、行星、日球层等目标的飞行任务安排，如图8，构建先进的进入与返回、地

图8 深空探测三个重点方向示意图

Figure 8 Schematic diagram of three key directions of deep space exploration.

月往返、能源与推进等工程能力体系, 全面开展国际合作促进人类命运共同体建设, 在深空探测领域形成统一的、持续的发展格局, 引领航天科技创新发展, 积极促进人类文明进步。

5.2 深空探测任务分级模式

基于任务目标、技术能力、系统规模、经费需求的约束, 将未来的深空探测任务分为三类。

小型任务. 该类任务体现“短平快”, 针对某项特定天体、科学目标或航天技术验证, 以成熟航天产品经适应性改造后实施发射, 探测器规模控制在3 t以内, 每10年实施4~5次, 成本较少。

中型任务. 该类任务体现高性价比, 针对多天体联合探测、多探测方式组合等目标, 在现有航天器、火箭等技术产品的基础上, 攻克较多新技术、研制部分新设备、建设部分新设施, 探测器规模控制在3~10 t, 每10年实施2~3次, 成本中等。

大型任务. 该类任务体现重大科学发现与技术带动性, 以地外天体样品采样返回、长期无人/机器人值守星表科研站等为目标, 攻克大量新技术、建设多个大型科研设施、研制全新航天器, 探测器规模控制在

10 t以上, 每10年实施1~2次, 成本较高。

5.3 三个方向发展目标及重点任务

(1) 以国际月球基地建设为重点的月球探测

围绕月球资源勘察利用等热点科学问题与应用需求, 实施机器人/载人相协调的可持续发展月球探测战略, 通过若干次小型和中型任务、少量的大型任务, 逐步建设可进行月球科学考察和研究、月球资源开发和利用、功能完备的国际月球基地, 实现人类在地外天体长期生存工作和地月空间资源规模开发利用^[32,33]。

基本型月球科研站. 由2~4次中小型任务构成, 发射月球极区资源勘察探测器, 获取极区永久阴影区水冰等挥发分含量及其分布等。发射月球极区采样返回探测器, 实现样品取样返回。发射月球极区资源开发利用探测器, 开展月球极区资源开发利用实验, 实现多探测器月面协同工作。完成载人月球探测前期飞行研制及月面着陆区勘探, 实施载人月球探测。

国际月球科研站. 由多次大型和中小型任务构成, 突破长期自主运行、资源原位利用等关键技术, 建设国际月球科研站, 作为科学实验以及人在地外天体生存能力的研究平台, 开展持续的月球探测和相关技术试验验证, 实现人机联合的月面原位资源开发利用。在利用月球科研站开展载人火星探测的相关技术研究和验证的同时, 在地月空间为载人火星探测提供部分可直接利用的基础设施, 如图9所示。

国际月球基地. 由多次大型和中小型任务构成, 突破资源原位规模利用等关键技术, 建设国际月球基地, 具备人类在地外天体长期生存和工作的能力, 实现月球原位资源规模开发利用。

(2) 以火星科研站建设为重点的行星探测

围绕太阳系的起源与演化、地外生命信息探寻、小天体和太阳活动对地球的影响等空间科学重大问题, 统筹开展巨行星、类地行星等天体或物质能量的探测, 开展火星、小行星资源利用, 解决地外天体进入与返回、重型运载火箭、高效轨道转移飞行器、人机联合探测以及原位资源开发与利用等问题, 实现载人登陆火星^[34], 建设火星科研站。

火星环绕、着陆与巡视探测. 中型任务, 发射首颗火星探测器, 如图10, 研究火星生命信息和生命存在环境, 优选和勘察火星着陆区; 探测火星物理场、大气层结构与成分及气象特征, 研究火星磁场、重力场、大

图 9 国际月球科研站概念图

Figure 9 Conceptual graph of ILRS.

图 10 火星任务飞行轨道示意图

Figure 10 Trajectory of Mars exploration mission.

气和气候的变化及其演化历史等。

火星取样返回. 大型任务, 在前期任务突破环绕、着陆、巡视等关键技术基础上, 以及获取的火星在轨及火表科学观测数据, 发射火星取样返回探测器, 实现火星的取样返回^[35], 研究火星起源、生命生存环境、行星系统演化, 开展比较行星学研究。

火星科研站. 由多次大型任务和中小型任务组成, 解决火星大质量进入、下降、着陆与上升, 高效轨道转移飞行器, 人机联合探测以及原位资源开发与利用等问题, 发展更新一代动力、能源、材料和结构、环控生保等技术, 完成无人飞行验证及载人环火、载人登火飞行, 建成火星科研站。

小行星及彗星探测. 中小型任务, 突破弱引力天体绕飞/附着/取样及自主控制、轻小型超高速再入返回、小推力轨道、长寿命高可靠电推进等关键技

术^[36,37]. 实现近地小行星绕飞、附着及取样返回和主带彗星探测, 为小行星起源及演化等前沿科学研究提供科学探测数据和真实样品。

木星系及以远探测. 中小型任务, 突破木星系等空间环境适应和防护、空间核电源、弱光照条件下高效光电转换等关键技术^[38], 具备实现木星系环绕和天王星达到的能力, 为深化对木星系和行星际的相关科学研究提供科学探测数据。

冰巨星探测. 中小型任务, 突破外太阳系天体捕获、空间核动力、超远距离测控支持、强磁飓风条件下微小卫星设计等关键技术, 具备海王星到达与环绕、海王星/天王星大气探测、海卫一等卫星穿透探测的能力, 为太阳系和恒星起源研究提供重要探测数据。

金星/水星探测. 中型任务, 突破自主导航与捕获制动、高效行星借力减速、日凌条件下高效测控通信、金星稠密大气与热环境的高速进入、金星飘浮器一体化集成化总体设计等关键技术^[39,40], 研制金星/水星环绕器和着陆器, 实现金星/水星全球遥感和软着陆探测。

(3) 以日球层顶探测为重点的太阳探测

围绕太阳系边际及邻近星际空间特性、行星天体物理等空间科学重大问题, 建立0.05 AU太阳抵近探测、内日球层多角度探测、20 AU内任意类型天体到达能力、60~100 AU全域到达能力、100 AU以远临近恒星际空间探索能力, 取得重大科学发现和重大科学

理论验证与完善。

太阳抵近探测. 小型任务, 太阳抵近探测器通过多次行星借力减速后, 达到0.05 AU处开展太阳抵近成像及科学探测, 近距离高分辨率观测太阳精细结构, 获取高分辨率图像, 研究突破太阳磁场起源和能量释放机制。

内日球层多角度探测. 开展环日全景探测, 准确测量光球层的矢量磁场, 提供360°太阳和内日球层的全景图像, 多尺度多经度的解析太阳风扰动结构^[41]。

太阳系边际探测. 由2次中型任务组成, 以日球层鼻尖和日球层尾部/太阳高纬两个方向为目标天域, 发射太阳系边际探测器, 如图11, 抵达100 AU的日球层顶开展双向联合就位探测, 并能够飞往更加遥远的恒星际空间开展探测与重大科学理论验证^[2]。

6 国际合作

以双边合作、多边合作为平台, 增进深空探测活动与各国科学界与工程技术领域的沟通交流, 开展国际合作政策、战略布局研究, 创新国际合作模式, 优化国际合作规则, 体现人类发展中的责任担当, 推动深空探测任务级、系统级国际合作, 共同开展科学数据、地外样品的研究。

任务规划. 与有意愿的国家共同开展深空探测领域重大科学问题的论证, 研究确定科学目标. 围绕国际月球科研站等任务, 开展多边或双边的任务联合设计与规划, 推动系统级的、分系统级的国际合作. 太阳系边际探测方面, 开展与相关国家日球层双向联合探测论证。

科学载荷. 依托国际深空探测任务路线图, 与有关国家开展科学载荷联合研制、相互搭载, 开展具有国际领先水平和开创性的科学载荷, 推动科学载荷研制水平, 促进科学产出。

科学研究. 落实政府间合作协议关于数据联合研究相关内容, 以科学数据及地外样品为重点扩展合作对象、加深合作内容. 推动建立各类联合实验室等实体组织, 深化中外科学家在地外天体样品、深空科学

图 11 基于空间堆电源的太阳系边际探测器示意图

Figure 11 Schematic diagram of solar system boundary exploration probe with power supplied from a space reactor.

领域的合作。

工程技术. 探索在国际月球科研站功能模块、空间堆电源在轨运行与管理、火星表面再入环境模拟与试验等领域的技术合作, 实现技术互补, 降低研制成本, 缩短研制周期。

国际法规与标准. 积极争取国际组织和有关国家支持, 共同开展外空资源开发利用规则等国际法规制订工作. 针对国内外行星保护发展现状及任务实施面临的实际问题, 积极突破行星保护关键技术, 提出发展建议, 制订行星保护规范、政策。

7 结束语

深空探测具有高度的战略性和辐射性、复杂性和创新性、挑战性和探索性, 是航天事业中最重要组成部分, 持续开展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。

当前世界处于深空探测的又一高潮, 应紧密围绕物质起源、生命起源等重大科学问题的探寻与研究, 整体长远规划, 系统构建能力体系, 加快实施深空探测相关任务, 切实开展国际合作与法律法规建设, 加强科学研究与成果应用, 实现重大发现与科学理论突破, 积极拓展人类生存发展空间, 并为促进人类文明进步做出重要贡献。

参考文献

- 1 Wu W R, Yu D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies (in Chinese). J Deep Space Explor, 2014, 1: 5-17 [吴

- 伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术. 深空探测学报, 2014, 1: 5–17]
- 2 Yu D Y, Wu X Y, Wu W R. Review of technology development for Chinese lunar exploration program (in Chinese). J Deep Space Explor, 2016, 3: 307–314 [于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述. 深空探测学报, 2016, 3: 307–314]
- 3 Wu W R, Liu J Z, Tang Y H, et al. China lunar exploration program (in Chinese). J Deep Space Explor, 2019, 6: 405–416 [吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程. 深空探测学报, 2019, 6: 405–416]
- 4 Wu W R, Yu D Y, Huang J C, et al. Exploring the solar system boundary (in Chinese). Sci Sin-Inf, 2019, 49: 1–16 [吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 1–16]
- 5 Sun Z Z, Meng L Z. Current situation and sustainable development trend of deep space exploration in China (in Chinese). J Nanjing Univer Aeronaut Astron, 2015, 47: 786–791 [孙泽洲, 孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势. 南京航空航天大学学报, 2015, 47: 786–791]
- 6 Wang D Y, Meng L Z, Ye P J, et al. Research of autonomous operation technology for deep space probe (in Chinese). Spacecr Eng, 2018, 27: 1–10 [王大轶, 孟林智, 叶培建, 等. 深空探测器的自主运行技术研究. 航天器工程, 2018, 27: 1–10]
- 7 Ye P J, Deng X J, Peng J. Features of deep space exploration in other countries and the enlightenment for the development in China (part 1) (in Chinese). Spacecr Environ Eng, 2008, 25: 401–415 [叶培建, 邓湘金, 彭兢. 国外深空探测态势特点与启示(上). 航天器环境工程, 2008, 25: 401–415]
- 8 Ye P J, Yu D Y, Sun Z Z, et al. Achievements and prospect of Chinese lunar probes (in Chinese). J Deep Space Explor, 2016, 3: 323–333 [叶培建, 于登云, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器的成就与展望. 深空探测学报, 2016, 3: 323–333]
- 9 Wang C, Yang F, Zhang F, et al. Hot topics of space science in 2019 (in Chinese). Science Herald, 2020, 38: 135–147 [王赤, 杨帆, 张凤, 等. 2019 年空间科学热点回眸. 科技导报, 2020, 38: 135–147]
- 10 Ye P J, Guo L L, Zhang Z X, et al. Risks and challenges of manned deep space exploration mission (in Chinese). Manned Spaceflight, 2016, 22: 143–149 [叶培建, 果琳丽, 张志贤, 等. 有人参与深空探测任务面临的风险和技术挑战. 载人航天, 2016, 22: 143–149]
- 11 NASA Technology Roadmaps Introduction, Crosscutting Technologies, and Index. National Aeronautics and Space Administration, 2015. <https://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html>
- 12 Schlutz J, Vangen S, Haese M, et al. Assessment of technology development for the ISECG global exploration roadmap. In: Proceedings of Global Space Exploration Conference. Washington D C: International Space Exploration Coordination Group, 2012
- 13 Wu W R, Wang Q, Tang Y H, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission (in Chinese). J Deep Space Explor, 2017, 4: 111–117 [吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计. 深空探测学报, 2017, 4: 111–117]
- 14 Liu J Z, Tang Y H, Long J, et al. Suggestions for China on establishing safety mechanisms for space nuclear power source applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 875–881 [刘继忠, 唐玉华, 龙杰, 等. 关于建立我国空间核动力源应用安全机制的建议. 科学通报, 2020, 65: 875–881]
- 15 Lunar Exploration Analysis Group. The Lunar Exploration Roadmap: Exploring the Moon in the 21st Century: Themes, Goals, Objectives, Investigations, and Priorities. 2013. <https://solarsystem.nasa.gov/studies/182/the-lunar-exploration-roadmap-exploring-the-moon-in-the-21st-century-themes-goals-objectives-investig/>
- 16 ESA. Mars express overview. http://www.esa.int/esaSC/120379_idx_0_m.html. 2013
- 17 Wang C, Li H, Guo X C. Major Scientific Problems in Exploring the Solar System Boundary (in Chinese). Scientific Development Report in 2019. Beijing: Science Press, 2020 [王赤, 李晖, 郭孝城. 太阳系边际探测的重大科学问题. 2019 科学发展报告, 北京: 科学出版社, 2020]
- 18 Yang H, Zhao W. Improved views of the moon in the early twenty first century: A review. Earth Moon Planets, 2015, 114: 101–135
- 19 Geng Y, Zhou J S, Li S, et al. Review of first Mars exploration mission in China (in Chinese). J Deep Space Explor, 2018, 5: 399–405 [耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务. 深空探测学报, 2018, 5: 399–405]
- 20 Fan Q L, Wang Q, Bai Q J. Review of 2018 global deep space activities (in Chinese). Science Herald, 2019, 37: 52–64 [范全林, 王琴, 白青江. 2018 年深空探测热点回眸. 科技导报, 2019, 37: 52–64]
- 21 Liu J Z, Pei Z Y, Yu G B, et al. Space engineering multi-state holographic model and its applications (in Chinese). J Astronaut, 2019, 40: 535–542 [刘继忠, 裴照宇, 于国斌, 等. 航天工程多态全息模型及应用. 宇航学报, 2019, 40: 535–542]
- 22 Hu C B, Huang Y M, Guo S L. Research on the concept of space traffic management (in Chinese). Space Debris Res, 2020, 20: 25–32 [胡朝斌, 黄宇民, 郭世亮. 空间交通管理概念研究. 空间碎片研究, 2020, 20: 25–32]
- 23 Wang D Y, Huang X Y. Survey of autonomous navigation and control for deep space exploration (in Chinese). Aerosp Control Appl, 2009, 35: 6–12 [王大轶, 黄翔宇. 深空探测自主导航与控制技术综述. 空间控制技术与应用, 2009, 35: 6–12]

- 24 Li J F, Cui W, Baoyin H X. A Survey of autonomous navigation for deep space exploration (in Chinese). *Mech Eng*, 2012, 34: 1–9 [李俊峰, 崔文, 宝音贺西. 深空探测自主导航技术综述. *力学与实践*, 2012, 34: 1–9]
- 25 Chen H, Sarton du Jonchay T, Hou L, et al. Integrated *in-situ* resource utilization system design and logistics for Mars exploration. *Acta Astronaut*, 2020, 170: 80–92
- 26 Hinterman E, Hoffman J A. Simulating oxygen production on Mars for the Mars oxygen *in-situ* resource utilization experiment. *Acta Astronaut*, 2020, 170: 678–685
- 27 Yu D Y, Zhang Z, Pan B F. Development and trend of artificial intelligent in deep space exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 7: 11–23 [于登云, 张哲, 泮斌峰, 等. 深空探测人工智能技术研究与展望. *深空探测学报*, 2020, 7: 11–23]
- 28 Lei Y J, Zhu L Y, Zhang W J. Research on power system development of Chinese deep space exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2020, 7: 35–40 [雷英俊, 朱立颖, 张文佳. 我国深空探测任务电源系统发展需求. *深空探测学报*, 2020, 7: 35–40]
- 29 Meng L Z, Dong J, Xu Y Q, et al. Analysis of key technologies for unmanned Mars sample return mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2016, 3: 114–120 [孟林智, 董捷, 许映乔, 等. 无人火星取样返回任务关键环节分析. *深空探测学报*, 2016, 3: 114–120]
- 30 Ye P J, Yang M F, Peng J, et al. Review and prospect of atmospheric entry and earth reentry technology of China deep space exploration (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 229–238 [叶培建, 杨孟飞, 彭兢, 等. 中国深空探测进入/再入返回技术的发展现状和展望. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45: 229–238]
- 31 Hirashita H, Lin C Y. Dust abundance and grain size in galaxy halos. *Planet Space Sci*, 2020, 183: 104504
- 32 Ouyang Z Y. Scientific objectives of chinese lunar exploration project and development strategy (in Chinese). *Adv in Earth Sci*, 2004, 19: 351–358 [欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略. *地球科学进展*, 2004, 19: 351–358]
- 33 Hou J W, Zhao C, Chang L P, et al. Genral conception of future lunar exploration (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2015, 21: 425–435 [侯建文, 赵晨, 常立平, 等. 未来月球探测总体构想. *载人航天*, 2015, 21: 425–434]
- 34 OuYang Z Y, Xiao F G. Major scientific issues involved in Mars exploration (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2011, 28: 205–217 [欧阳自远, 肖福根. 火星探测的主要科学问题. *航天器环境工程*, 2011, 28: 205–217]
- 35 Yu D Y, Sun Z Z, Meng L Z, et al. The development process and prospects for mars exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2016, 3: 108–113 [于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望. *深空探测学报*, 2016, 3: 108–113]
- 36 Zhang R Q, Huang J C, He R W, et al. The development overview of asteroid exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2019, 6: 417–423, 455 [张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述. *深空探测学报*, 2019, 6: 417–423, 455]
- 37 Xu W B, Zhao H B. Deep space exploration of asteroids: The science perspectives (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2005, 11: 31–38 [徐伟彪, 赵海斌. 小行星深空探测的科学意义和展望. *地球科学进展*, 2005, 11: 31–38]
- 38 Xia Y X, Lu B. Future development of Jupiter and Saturn exploration (in Chinese). *Space Int*, 2012, 8: 24–31 [夏亚茜, 卢波. 木星和土星探测的未来发展态势. *国际太空*, 2012, 8: 24–31]
- 39 Zhang W. Venus explortion—special deep-space tranel (in Chinese). *Aerospace Shanghai*, 2012, 29: 1–6 [张伟. 金星探测——独特的深空之旅. *上海航天*, 2012, 29: 1–6]
- 40 Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Progress on international Venus exploration programs and implement of Venus gravity gradiometry mission in China (in Chinese). *J Geodesy Geodyn*, 2014, 34: 8–14 [郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际金星探测计划进展和我国金星重力梯度计划的实施. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34: 8–14]
- 41 Wang Y M, Ji H S, Wang Y M, et al. Concept of the solar ring mission: An overview. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 1699–1713

Strategy of deep space exploration

LIU JiZhong¹, HU ChaoBin¹, PANG FuChuan¹, KANG Yan¹, LI Hui², MA JiNan³ & LU Xi⁴

¹ Lunar Exploration and Space Engineering Center, China National Space Administration, Beijing 100190, China;

² National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³ China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

⁴ Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China

This paper elaborates on eleven hot scientific objectives and three scientific application problems in lunar, planetary, and solar exploration on the basis of a comprehensive overview on the development history, research status, and main trend of international deep space explorations, combined with the requirements of the long-term sustainable development of China deep space exploration. Eight types of capabilities that the deep space exploration engineering system should be constructed are given. The overall development goals, as well as the mission classification model, eleven detection priorities, mission assumptions, and the direction and emphasis of international cooperation, are also analyzed. This study serves as a reference for the development of deep space exploration.

deep space exploration, lunar exploration, scientific application, engineering system, international cooperation

doi: [10.1360/SST-2020-0207](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0207)