

小行星探测发展综述

张荣桥¹, 黄江川², 赫荣伟², 耿言¹, 孟林智³

(1. 国家国防科技工业局 探月与航天工程中心, 北京 100190;

2. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 小天体上保存着太阳系形成初期的原始成分, 同时可能蕴含着地球生命与水起源的重要线索, 是研究太阳系起源和演化历史的活化石。近年来, 小行星探测已成为主要航天国家深空探索领域的重点发展目标之一。简要总结了国际上小天体探测历程, 对小行星探测的研究和发展趋势进行了综述, 重点探讨了未来小行星探测任务面临的主要关键技术, 并对中国后续开展小行星探测活动提出了相关建议。

关键词: 小行星探测; 关键技术; 发展综述

中图分类号: P185.7, V57

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)05-0417-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.05.002

引用格式: 张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述[J]. 深空探测学报, 2019, 6 (5): 417-423, 455.

Reference format: ZHANG R Q, HUANG J C, HE R W, et al. The development overview of asteroid exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (5): 417-423, 455.

引言

对未知世界的探索是人类发展的永恒动力和不懈追求。深空探测通常指的是对月球及以远的地外天体进行空间探测的活动^[1]。深空探测既是航天活动发展的必然选择, 也是人类进一步了解宇宙、探索生命的起源和演化、获取更多科学认识、开发和利用空间资源的重要手段, 对科技进步和人类文明的发展具有极为重要的意义^[2]。

太阳系小天体是指围绕太阳运转但不符合行星或矮行星条件的天体, 包括小行星, 彗星, 流星和其他星际物质。其中, 小行星保留了早期太阳系起源、形成与演化时的重要信息, 同时可能蕴含着地球生命与水起源的重要线索, 是研究太阳系起源的“活化石”。从20世纪90年代开始, 以小行星为目标的探测活动日益增多, 成为深空探测领域一个备受关注的热点, 并获得了较为丰硕的成果。

2004年开始实施的探月工程拉开了我国深空探测的序幕, 2019年1月, 我国的“嫦娥4号”探测器实现了世界首次月背软着陆探测^[3-4], 取得了五战五捷的成果。

在探月工程取得阶段性成果的基础上, 2016年1月, 首次火星探测任务立项^[5], 深空探测列入《中华

人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》“科技创新2030—重大项目”。同年12月27日发表的《2016中国的航天》白皮书中明确指出: “深空探测……开展火星采样返回、小行星探测、木星系及行星穿越探测等的方案深化论证和关键技术攻关, 适时启动工程实施, 研究太阳系起源与演化、地外生命信息探寻等重大科学问题。”

近年来, 小行星探测已成为主要航天国家深空探测领域的重点发展目标之一。2013年8月, 由包含中国航天局、欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 和美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 在内的14个航天局联合建立的国际空间探测协调小组 (简称ISECG) 发布了《全球探索路线图》^[6], 其中确定了小天体探测的主要任务是: ①验证创新的外层空间探索技术和能力; ②加深理解太阳系自然天体的演变和生命演进; ③测试用于抵御来自近地小行星风险的方法。

本文在对人类小天体探测历程进行简要综述基础上, 对未来小行星探测规划及其面临的主要关键技术进行了论述, 并给出了相应启示和建议。

1 小天体探测发展历程

人类最初是用地基望远镜来观测和研究小行星,

只能获得基本轨道参数和一些物理特性,对物质组成、内部结构、引力场等参数的测定几乎是空白。随着航天技术的发展,人类于20世纪70年代用航天器对小天体进行近距离观测。国际上小天体探测已有30

多年历程,美、欧、日先后完成了各自独特的标志性任务。截止到目前,世界各国共实施了14次小天体探测,其中日本、美国的小行星采样返回任务均已到达探测目标,正在开展采样等在轨操作。如图1所示。

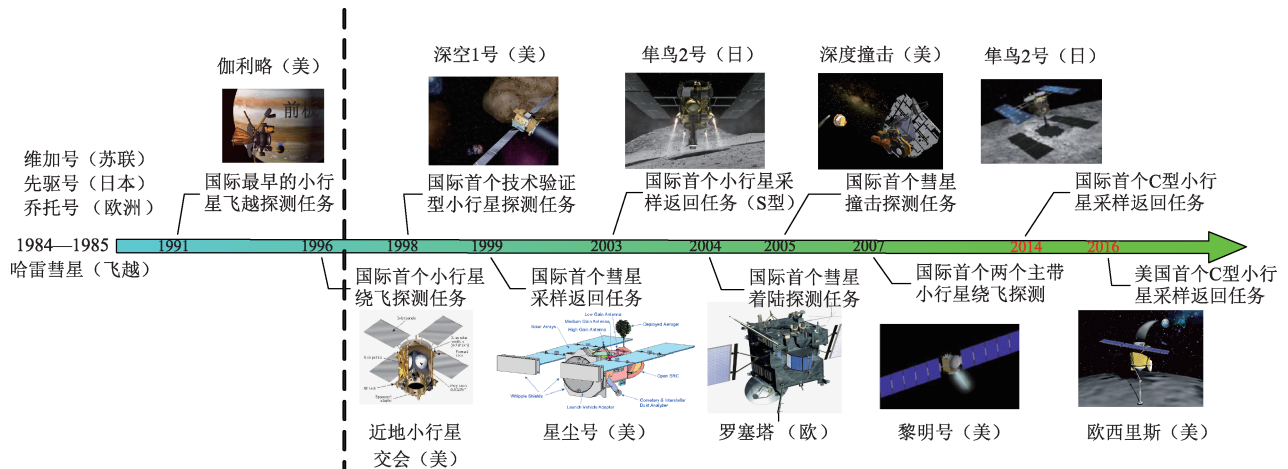


图1 国外已开展的小天体探测任务

Fig. 1 History of small body exploration mission

从发展历程看,小行星探测经历了近距离飞越(如“深空1号”(Deep Space 1)、“星尘号”(Stardust)和“罗塞塔号”(Rosetta)探测任务),到小行星绕飞探测(“如近地小行星交会”(Near Earth Asteroid RendezvoHs, NEAR)探测器和“黎明号”Dawn探测任务),再到附着就位探测(如Rosetta任务),发展到了目前的小行星表面采样返回计划(如“隼鸟号”(Hayabusa 1、Hayabusa 2)和“欧西里斯号”OSIRIS-REx任务)。

从科学成果看,通过不同探测形式任务,确定了目标小天体的精密轨道、运动速度、体积、物质组成、内部结构^[7-19]。如:美国“深空1号”任务飞越彗星19P/Borrelly,探测了彗星和小行星的大小、形

状、表面特征、亮度、质量、密度、彗星核的自转状态,研究了彗发的等离子体特征、彗发和太阳风的相互作用、亮度和彗星核喷发的尘埃和气体流的特征;日本“隼鸟1号”(Hayabusa 1)任务对返回样品在地面实验室中进行了氨基酸、多环芳香烃等有机化合物的分析测试,结果证明Itokawa的有机化合物属于非生物成因等等。这些任务都紧紧围绕着太阳系起源和生命起源等科学问题,深化太阳系起源和行星形成演化规律的认识,探索生命起源。

2 小天体探测任务特点及发展趋势

近年来,美国、欧空局和日本等航天机构和国家也规划了多个小行星探测任务^[20-21],如表1所示。

表1 国外已规划的小行星探测任务

Table 1 Planed asteroid exploration missions

任务	国家	计划时间	任务目标
Lucy	美国	2021年	飞越探测特洛伊小行星
DART	美国	2021年	撞击近地双体小行星
Psyche	美国	2022年	探测主带M型灵神星
Destiny	日德	2022年	小行星尘埃探测
Castalia	欧洲	2028年	主带彗星133P绕飞探测
GAUSS	欧洲	2029年	谷神星采样返回

1) 美国持续深入开展小行星探测

美国开展小天体探测较早,也是迄今为止开展小天体探测任务次数最多的国家,共发射了4颗以小行星探测为主任务的探测器,探测对象由近地、主带小

行星、彗星扩展到柯伊伯带小行星。其中,“黎明号”探测器已完成主带“谷神星”(Ceres)和“灶神星”(Vesta)的绕飞探测;“新地平线号”(New Horizons)于2019年1月1日飞越了距太阳远达43 AU的柯伊伯

带小天体 2014MU69 (Ultima Thule), 并从其形状直接证实了行星形成的卵石吸积模型。至此, 人类探测器已遍及八大行星和小行星、彗星以及柯伊伯带天体。

2016年9月9日, 美国发射了小行星采样返回探测器“欧西里斯号”, 奔赴古老的小行星贝努 (Bennu) [22-23], 2018年12月3日抵达碳质小行星附近, 目前正开展详查, 确定了采样点, 将于2023年9月携带样品返回地球。该任务是继“阿波罗”登月项目采集月岩样品和“星尘”探测器携带彗星样品回到地球后, NASA又一个深空领域的采样返回任务。通过该任务的实施, 美国将继续扩大与其他国家的差距, 保持其在航天领域的领跑地位。

2017年1月, NASA公布了两个最新入选的发现级、低成本探测任务, 分别是“露西 (Lucy)”任务和“赛姬 (Psyche)”任务。其中, “露西”任务计划于2021年发射, 于2025年抵达小行星带, 2027—2033年探测特洛伊群小行星。任务包括1个位于小行星带的目标和5个被木星束缚在轨道的特洛伊群小行星。“赛姬”任务计划于2023年10月发射, 于2030年抵达16号小行星 Psyche, 该目标是一个由铁、镍和稀有金属 (包括金、铂和铜) 组成的大型金属体, 其直径超过 200 km, 探测器将展开为期 20 个月的探测研究。

此外, NASA 近期还将实施一个双体小行星撞击任务 (DART), 对“动能撞击” (Kinetic Impact) 防

御技术进行先期在轨验证。DART 撞击器预计 2021 年发射, 于次年 10 月撞击目标小行星。该探测器在撞击前将对主星和从星表面形态和地质进行探测。撞击将在地面观测能力允许情况下开展, 全过程由地面进行观测, 并评估动力撞击的实施效果。

2) 日本深空探测活动以小行星为主

日本在小行星探测领域起步较晚, 但以独特的思路和规划开展了以一步实现小行星采样返回为目标的, 取得了重大突破。

2010年6月, 日本“隼鸟号”成功完成世界首个采样返回任务, 返回地球, 在业界造成的巨大轰动。JAXA 顺势推出“隼鸟2号”计划, 北京时间2014年12月3日成功发射“隼鸟2号”, 该探测器于2018年抵达目标小行星, 目前已在轨完成两次触碰采样操作, 2020年将携带样品返回地球。

日本与德国合作, 还将于2022年发射“命运+” (Destiny+) 探测器, 2026年前后将抵达近地小行星 Phaethon 附近, 对其周边尘埃的成分进行分析, 并观察尘埃的速度和方向等。

图2为日本小天体探测规划图。日本的专家们认为, “隼鸟1号”和“隼鸟2号”仅仅是其深空探测计划的开始, 日本将坚持自主开发的理念, 继续对太阳系以及生命起源和演化进行系统、有步骤的探测。这表明, 日本希望以小行星探测所取得的领先世界水平的研究成果为契机, 跻身世界深空探测领域的先进行列。

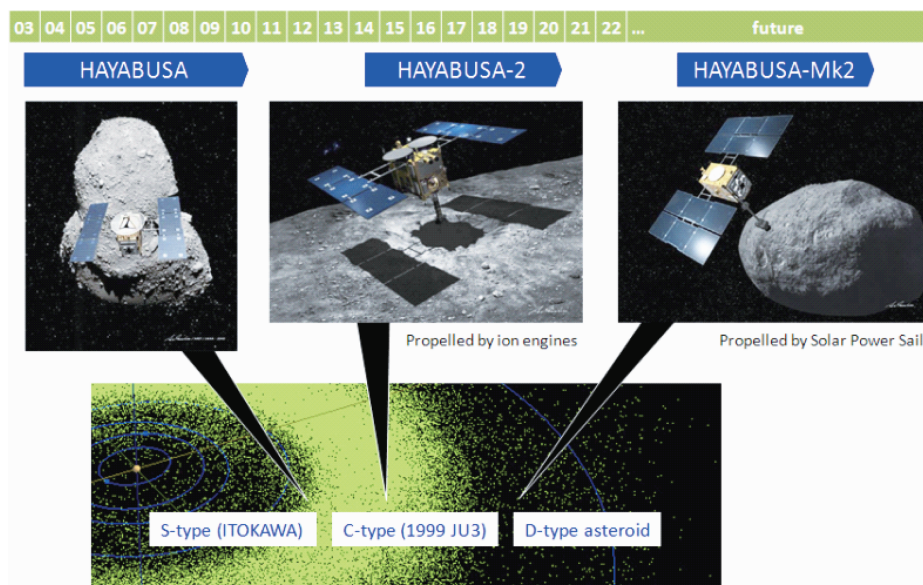


图2 日本小行星探测规划路线图

Fig. 2 Roadmap of Japan asteroid exploration

3) 欧洲依托国际合作, 积极推动小行星采样返回任务

欧洲在彗星探测方面处于领先地位, 在小行星探测方面尚未有探测经历, 主要依托国际合作积极推动小行星探测任务的实施。

2004年3月2日, ESA的“罗塞塔-菲莱”(Rosetta-Philae)探测器^[24]发射成功, 目标与楚留莫夫-格拉希门克(67P/Churyumov-Gerasimenko)彗星交会并对其进行就位探测。探测器借助了1次火星和3次地球的引力加速, 飞行了10年, 于2014年11月12日, 菲莱着陆在目标彗星表面, 并开展了就位探测。

在彗星探测取得重大成就的同时, 欧洲也在积极推进小行星探测任务。2015年, 法国巴黎天文台、英国开放大学和中国空间技术研究院、北京理工大学等多个国内外研究机构共同提出MarcoPolo-2D项目, 并申请了ESA的Cosmic Vision M4任务, 拟完成2011 SG286小行星的样品采样返回, 后由于多种原因没有入选。近期欧洲科学家们也提出了主带彗星133P探测任务和谷神星采样返回任务。

4) 中国发展现状

20世纪90年代初, 我国就启动了对小行星探测的相关基础研究。中国科学院天文台系统对太阳系小行星开展了数10年的持续天文观测, 在小行星观测、小行星轨道力学、星历预测等方面具有较好的基础。清华大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学等单位开

展了小行星探测轨道设计、暗弱天体识别与跟踪等技术的理论研究。

2012年12月13日16:30, 我国“嫦娥2号”在距地球约700万km远的深空, 精确实现与图塔蒂斯(Toutatis/4179号)小行星的近距离飞越探测, 在国际上第一次成功获取了该小行星的高分辨率光学图像^[25], 为我国深入开展小行星探测奠定了必要的工程实践基础。

从“嫦娥2号”获取的4179号小行星高分辨率图像中, 我们研究了该小行星的物理特性、表面特征、内部结构以及可能的起源等, 发现图塔蒂斯拥有不规则形状和不平坦表面, 其形似一根生姜, 由较小的一端“头部”(Head)与较大的一端“身体”(Body)组成。通过分析获得了图塔蒂斯表面的一些新特征, 这在以往地面雷达观测中未曾发现: 在“身体”端部存在一个直径大约800m的巨型盆地, 在其表面找到了超过50处较为明显的、大小不一的陨石坑, 其中包括两个先后产生在同一位置附近相互有部分遮盖的陨坑; “颈部”则以近乎垂直角度连接着“头部”和“身体”; 其表面存在超过30个有巨石特征的区域; 通过图像甚至可分辨出尺寸较小的线状结构等特征^[26](图3)。从其结构特征可推断图塔蒂斯很可能是一颗具有碎石堆结构的密近(Close Approach)双小行星, 可能由两个独立小天体缓慢靠近形成, 或是YORP效应作用的结果, 亦或是大规模的撞击造成。

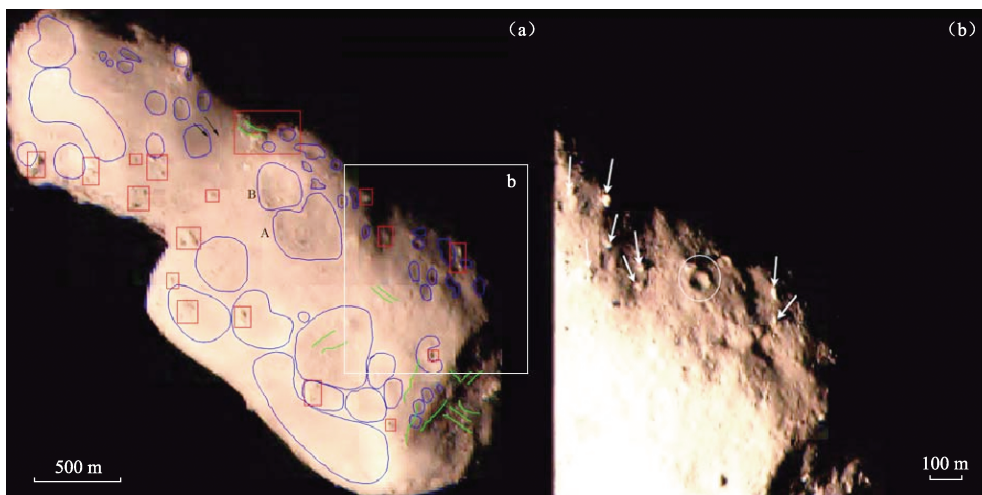


图3 图塔蒂斯表面的各种地貌特征
Fig. 3 Physiognomy Features of Tutattis

此外, 2010年以来, 国内相关研究机构、高校在民用航天预先研究、自然科学基金等支持下, 对小行星探测开展了研究和先期技术攻关, 在小行星监测与防

御技术、小天体探测策略研究(含目标选择)、小行星资源开发与利用技术、弱引力小天体表面探测等方面取得了相关研究成果。

5) 主要启示

总结过去多年小行星探测的发展历程,从已实施的任务和各国规划中可以看出,小行星探测与月球探测、火星探测同属21世纪深空探测的重要研究方向,具体呈现出以下趋势:

(1) 小行星探测已从飞越和伴飞探测发展到表面软着陆和采样返回探测

在小行星探测早期,由于技术原因,尚不能完成小行星表面着陆及返回探测,只能是飞越或者伴飞,小行星探测也多作为某一探测任务的拓展阶段来完成。但随着轨道设计及导航控制技术、先进的推进技术及表面操作技术的不断进步,小行星探测形式逐渐发展为就位探测和采样返回探测,因而能够获得更大的科学探测成果。目前,日本已实现了小行星表面采样返回,欧洲“罗塞塔-菲莱”探测器也在彗星表面对其进行更加细致的科学研究,而美国、欧洲、日本的后续规划中,均积极推进着小行星采样返回任务的实施。

(2) 小行星探测任务科学目标亮点多,新技术带动性强

小行星和彗星等太阳系小天体被认为是太阳系形成之初的残余物质,可为行星起源、太阳系演化和生命起源等基础重大科学研究提供重要线索。围绕小天体,科学家提出了“有机物的起源、水的分布与来源、动力学形成与演化、近地小行星的碰撞威胁”等前沿科学问题,这些科学问题强烈地吸引着科学家们的探测热情。

小天体探测任务的实施也涉及到空间推进技术、空间能源技术、小天体表面附着技术、微重力条件下采样技术等一系列关键技术,而探测任务周期长、目标距离远、目标尺寸适中,使小天体探测成为这些新技术得天独厚的试验场。美国“深空1号”探测器和日本“隼鸟号”探测器均在新技术演示验证中取得了重要成果,所验证的技术,也为各国在后续深空探测任务提供了重要的技术保障。

(3) 小行星探测是航天高科技领域开展国际合作的良好平台

小天体数量众多,轨道复杂多变,形态形状各异,探测难度很大。任何一个国家或组织仅凭一己之力无法对众多小行星进行全面的研究,国际合作成为必然。如“黎明号”探测器科学载荷来自德国、意大利等多个航天部门或研究所,“罗塞塔-菲莱”探测器更是集美、法、德、意等多国之力,才完成了目前完善的科学载荷配置,国际合作将在后续小行星探测中

实现“常态化”。

3 主要关键技术

小行星具有“微引力、不确定”的环境特点。“微引力”是指小行星表面为微引力环境(约 $10^{-4}g$),逃逸速度很低;“不确定”是指小行星的先验知识很少,在探测器到达之前,一般只能借助天文观测和理论假设推测其自转周期、地形地貌、表面物理特性等,先验知识很少。因此,小行星采样返回技术的实现过程与月球、火星等大行星有本质不同,需在探月工程、火星探测基础上进一步突破一批新的核心技术,其中,精确定点附着控制、弱引力附着采样、长寿命电推进、轻小型化高速再入返回等是亟需突破的关键技术。

1) 精确定点附着控制

小行星距离地球遥远,地面观测仅可获得基本轨道参数和少量物理特性;小行星的微弱引力场导致不能建立环绕轨道,所以对小行星物质成分、形状的分辨率十分有限,对体积大小、结构、地形地貌、运动特性(旋转轴方向、精确的旋转周期)、引力场、磁场等物性信息几乎是空白。传统上,探测目标及其所处环境的规律是航天器着陆导航的条件,但是,小行星附着探测正是为了获得这些规律开展的科学活动。传统的导航方式不能支持探测器在尺寸只有百米级的小行星表面安全、准确地附着。

此外,小行星的星历存在一定偏差,随着器地距离的增加,地面测定轨的精度也显著降低,仅依赖地面测定轨结果难以满足探测器与小行星交会、附着的任务需求。

综上,无论是在模型建立、控制方案还是敏感器能力方面,都要求有更高的裕度和更大的鲁棒性,以适应小行星目标特性不确定性带来的影响^[27-28]。为了保证探测器的安全和工程任务目标的完成,探测器应具备高精度、高鲁棒性的自主导航与定点附着控制能力^[29]。

2) 弱引力采样

探测器在小行星表面附着,对小行星进行采样是获取小行星信息的重要方式,需要实现小行星在弱引力环境下的交会、附着以及采样等操作。从小行星资源开发与利用需求来看,长期附着将在后续任务中扮演重要角色,而表面的多点采样探测将会扩大任务的探测范围,提高任务的回报。

小行星附着采样过程可分为附着表面、样品收集、样品转移等环节,各个环节均面临新的问题和技

术挑战。

附着表面过程中,小行星的引力场微弱,表面逃逸速度小,最大的可能就是附着时发生反弹,失控反弹是小行星附着中最危险的环节,探测器可能发生姿态失控、翻滚甚至碰撞损坏,如何在接触小行星的过程中维持姿态和避免失控是挑战之一。

样品收集过程中,不同于月球和火星,小行星样品收集过程中所有物质都基本处于自由运动状态,重力环境下可使用的开放式铲、挖等方式均失效。需专门开展适应于微引力环境的样品收集方法,主要需解决如何约束样品的运动方向等挑战。

样品转移过程与样品收集类似,需解决如何约束样品运动方向的问题,需尽可能提高样品转移方法的适应性。另外,为确保采样成功并满足任务要求,还需确认样品转移至返回器内的最终状态,测量样品采集量。

小行星附着采样过程复杂,接口约束多。上述各环节的技术挑战给采样机构、样品容器等系统设计、试验验证等方面都带来了较大的难度,需结合任务顶层需求,开展附着采样系统一体化、精细化设计,构建成验证环境,开展充分的地面试验及验证工作。

3) 长寿命电推进

探测器从地球飞行至主带以远的目标小行星开展绕飞探测,全过程需约8 km/s的速度增量要求。一方面探测器向主带以远飞行,距离太阳越来越远,太阳翼功率输出能力对应下降,为了与不同太阳距离条件下太阳帆板输出功率的大小相匹配,离子电推进系统功率须能在较大范围内进行多工作点调节。另一方面,电推进系统需具备长期连续开机工作的能力,如“黎明号”探测器离子电推力器在轨点火已超过3万h;同时考虑任务过程中恶劣的环境条件,电推进在热设计、防尘设计等方面也需重点考虑。因此,小行星探测离子电推进需能够在宽功率范围内多工作点调节,具备长期自主连续工作能力,需针对任务的具体需求和约束开展技术攻关和试验验证。

4) 轻小型化高速再入返回

小行星采样返回任务中,返回器再入速度将超第二宇宙速度,达到约13 km/s;再入过程将承受最高约12 MW/m²的热流。根据美国“星尘”“起源号”返回器的在轨数据研究,返回后体湍流热流比层流热流高数倍^[29]。如果直接采用传统的层流热环境预测方法预估返回器再入热环境,可能造成背面防热结构过于薄弱,再入时在湍流热的条件下可能造成结构烧穿,但按湍流热设计则会造成结构超重。

针对小行星高速再入返回的任务需求和约束,需开展超高速超雷数扰流下转捩准则研究和评估;攻关研制耐高温、高热流密度的功能梯度隔热材料和高强度超音速伞;开展返回器的轻量化、精细化系统设计。

4 结束语

小行星探测“小中见大”,任务体现了多样性和独特性,聚焦探寻宇宙的起源演化、物质结构等重大基础前沿科学问题,反映公众感兴趣的工程基础问题(资源开发及撞击预警),已成为深空探测的热点。对于开辟新疆域、揭示生命起源、推动技术进步、开发天然资源、保护地球安全等方面有显著意义,是推动我国从航天大国走向航天强国,落实创新驱动发展国家战略的重大实践活动之一。

小行星探测将面临更多的新技术挑战,前沿性和基础性问题更多。我国利用“嫦娥2号”探测器,抓住机遇成功实现了对小行星“图塔蒂斯”的飞越探测,积累了一定的工程经验;“嫦娥5号”飞行试验器的成功实施,突破并掌握了高速再入返回关键技术;“嫦娥5号”将突破月球无人自动采样技术。这些工程成果证明我国已初步掌握了多目标探测任务设计、探测器轨道测量、高可靠自主控制与管理、目标捕获等理论和技术,为开展小行星多目标多任务探测奠定了较好的基础。

小行星探测活动能够为国际与区域空间合作提供良好的平台,是我国在空间探测领域开展国际合作的有力抓手,科学成果和工程实践的实现,能够极大增强我国参与国际空间协调和活动的的能力。

小行星探测的实施将牵引我国空间科学与探测技术协调发展,在行星探测发展规划中具有承前启后的作用。选准时机实施小行星探测任务,并获得具有独创性和世界影响力的科学成果,将进一步推动航天技术、空间科学等领域的创新和突破。

参 考 文 献

- [1] 叶培建,邹乐洋,王大铁,等.中国深空探测领域发展及展望[J].国际太空,2018,478(10):6-12.
YE P J, ZOU L Y, WANG D Y, et al. Development and prospect of chinese deep space exploration[J]. Space International, 2018, 478(10): 6-12.
- [2] 孙泽洲,孟林智.中国深空探测现状及持续发展趋势[J].南京航空航天大学学报,2015,47(6):108-113.
SUN Z Z, MENG L Z. Current situation and sustainable development trend of deep space exploration in China[J]. Journal of Nanjing

- University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(6): 108-113.
- [3] 吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 111-117.
- WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017(2): 111-117.
- [4] YE P J, SUN Z Z, ZHANG H, et al. An overview of the mission and technical characteristics of Chang'e 4 Lunar Probe[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(5): 658-667.
- [5] 耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 399-405.
- GENG Y, ZHOU J S, LI S, et al. Review of first Mars exploration mission in China[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 399-405.
- [6] ESA. Human spaceflight microgravity and exploration[EB/OL]. [2019-08-20]. <http://www.globalspaceexploration.org>.
- [7] RAYMAN M D, VARGHESE P D, LEHMAN H, et al. Livesay, “results from the DeepSpace I technology validation mission,” AA-99-IAA. 11.2.01[C]//50th International Astronautical Congress. Amsterdam, The Netherlands: [s.n.], 1999.
- [8] ALTWEGG K, BALSIGER H, BAR-NUN A, et al. 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio[J]. Science, 2015, 347: 1261952.
- [9] NOGUCHI T, NAKAMURA T, KIMURA M, et al. Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa Dust particles[J]. Science, 2011, 333(6064): 1121-1126.
- [10] AMMANNITO E, DESANTIS M C, CIARNIELLO M, et al. Distribution of phyllosilicates on the surface of Ceres[J]. Science, 2016, 353(6303): 4279.
- [11] HIROHIDE D. Pole and global shape of 25143 Itokawa[J]. Science, 2006, 312(1347): 1126574.
- [12] LAURETTAD S, BARTELSA E, BIERHAUSE B, et al. The OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu: constraints on its physical, geological, and dynamical nature from astronomical observations[J]. Meteorit. Planet. Sci., 2015(50): 834-849.
- [13] HERGENROTHER C W. Lightcurve, color and phase function photometry of the OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu[J]. Icarus, 2013(226): 663-670.
- [14] BOTTKIEW F, VOKROUHLICKY D, RUBINCAMP P, et al. The Yarkovsky and YORP effects: implications for asteroid dynamics[J]. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 2006, 34: 157-191.
- [15] LAURETTAD S. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu[J]. Space Sci. Rev., 2017, 212: 925-984.
- [16] DALY M G, BARNOUIN O S, DICKINSON C, et al. The OSIRIS-REx Laser Altimeter (OLA) investigation and instrument[J]. Space Sci. Rev., 2017, 212: 899-924.
- [17] DELBO M, LIBOUREL G, WILKERSON J. et al. Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids[J]. Nature, 2014, 508: 233-236.
- [18] SCHEERES D J, HESAR S G, TARDIVEL S, et al. The geophysical environment of Bennu[J]. Icarus, 2016, 276: 116-140.
- [19] BINZEL R P. Spectral slope variations for OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu: possible evidence for a fine-grained regolith equatorial ridge[J]. Icarus, 2015, 256: 22-29.
- [20] 邹小端, 小行星探测——太空争夺的新前沿[J]. 太空探索, 2017(5): 1-3.
- [21] LANDIS M E. Water vapor contribution to Ceres' exosphere from observed surface ice and postulated ice-exposing impacts[J]. J. Geophys. Res. Planet, 2019, 124: 61-75.
- [22] CHESLEY S R, FARNOCCHIA D, NOLAN M, et al. Orbit and bulk density of the OSIRIS-REx target Asteroid (101955) Bennu[J]. Icarus, 2014, 235: 5-22.
- [23] LAURETTAD S, OSIRIS-REx Team. An overview of the OSIRIS-REx asteroid sample return mission[J]. Lunar and Planetary Inst. Technical Report, 2012, 43: 2491.
- [24] ESA. Rosetta——comet nucleus sample return[EB/OL]. [2019-08-20]. <http://www.doc88.com/p-6971564445676.html>.
- [25] HUANG J C. The engineering parameters analysis of (4179) Toutatis flyby mission of Chang'e-2[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 43: 596-601.
- [26] HUANG J C, JI J H, YE P J, et al. The ginger-shaped asteroid 4179 Toutatis: new observations from a successful flyby of Chang'e-2[J]. Nature Scientific Report, doi: 10.1038/srep03411.
- [27] 崔祐涛, 崔平远. 软着陆小行星的自主导航与制导[J]. 宇航学报, 2002, 23(5): 1-4.
- CUI H T, CUI P Y. Autonomous navigation and guidance for soft-landing asteroid[J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(5): 1-4.
- [28] 李俊峰, 崔文, 宝音贺西. 深空探测自主导航技术综述[J]. 力学与实践, 2012, 34(2): 1-9.
- LI J F, CUI W, BAOYIN H X. A survey of autonomous navigation for deep space exploration[J]. Mechanics and Engineering, 2012, 34(2): 1-9.
- [29] 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[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(3): 229-238.
- 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[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(3): 229-238.

作者简介:

张荣桥 (1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 国防科工局探月与航天工程中心, 中国首次火星探测任务工程总设计师, 深空探测论证总设计师。

通讯地址: 北京市海淀区知春路65号院中国卫星通信大厦B座(100190)

电话: (010) 68378289

E-mail: gespee@vip.sina.com

(下转第455页)

小行星远距离抵近轨道

丹尼尔 J. 谢尔斯

(科罗拉多大学 博尔德分校 史密德航天工程科学系, 博尔德 80309-0429, 美国)

摘要: 讨论了小行星引力一阶项可被忽略情况下的小行星远距离轨道设计及动力学。此时, 航天器的运动受太阳引力和太阳光压的影响。航天器和小行星的加速度之差在这两者之间形成的独特的相对动力学, 为航天器在小行星附近停驻与观测提供特定轨道。完整解决了小行星处于圆形日心轨道这一较简单情况, 也考虑和阐述了椭圆轨道情况, 并取得了一些初步结果。

关键词: 小行星; 抵近轨道; 运动方程; 高阶校正

[责任编辑: 高莎]

(上接第423页)

The Development Overview of Asteroid Exploration

ZHANG Rongqiao¹, HUANG Jiangchuan², HE Rongwei², GEN Yan¹, MENG Linzhi³

(1. Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, Beijing 100190;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094;

3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

Abstract: The small bodies retain the original elements of early solar system, and may contain important clues to the origin of the earth's life and water. They are living fossils for studying the origin and evolutionary history of the solar system. Asteroid exploration has become research hotspots of international deep space exploration in recent years. The process of small bodies exploration is briefly summarized, and the research and development of asteroid exploration is reviewed, as well the key technologies of asteroid missions. Based on the deep space exploration capability of China, some suggestions are put forward to carry out future asteroid exploration.

Keywords: asteroid exploration; key technology; development overview

Highlights:

- The small bodies retain the original elements of early solar system, and they are living fossils for studying the origin and evolutionary history of the solar system.
- Asteroid exploration has become research hotspots of international deep space exploration in recent years.
- The research and development status of asteroid exploration is summarized and reviewed.
- The key technologies of asteroid exploration missions are analyzed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]