



天问二号小天体探测任务

张荣桥¹, 张焄^{2*}, 刘建军^{3*}, 耿言¹, 孟林智², 李海涛⁴, 于天一⁵, 薛长斌⁶

1. 探月与航天工程中心, 北京 100037

2. 中国空间技术研究院, 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

4. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

5. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094

6. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

*联系人, 张焄, E-mail: zhanghe_maoqiu@163.com; 刘建军, E-mail: liujj@nao.cas.cn

收稿日期: 2025-03-01; 接受日期: 2025-04-21; 网络出版日期: 2025-05-30

国家科技重大专项资助项目

摘要 小天体探测是当今深空探测的热点, 天问二号小天体探测任务是我国行星探测工程的重要组成部分, 是对太阳系未知领域的又一次探索. 本文系统梳理了国际小天体探测的发展历程、主要科学问题和工程技术特点, 重点介绍了天问二号任务的工程目标、科学目标、载荷配置、飞行方案和关键技术, 详细设计了2016 HO₃小行星近距离探测规划和采样规划, 分析了科学目标的可实现程度. 天问二号将通过一次任务实现近地小行星2016 HO₃的伴飞探测和取样返回, 并对主带彗星311P开展伴飞探测, 有望在工程技术上取得突破, 实现重大原创科学发现, 推动行星探测能力和行星科学的发展进步.

关键词 天问二号, 小天体探测, 总体方案

PACS: 95.55.Pe, 96.25.-f, 84.40.Xb

1 引言

2021年12月, 我国行星探测工程(命名为“天问”工程)作为国家重大科技专项工程立项实施, 该工程包括首次火星探测(天问一号)、小天体探测(天问二号)、火星取样返回(天问三号)、木星系探测(天问四号)4次任务, 其中天问一号任务已经于2016年先期启动并于2021年取得圆满成功. 目前正在实施的天问二号任务, 目标是通过一次任务实现近地小行星2016 HO₃的伴飞

探测和取样返回, 并对主带彗星311P开展伴飞探测.

2006年, 国际天文学联合会(IAU)通过了太阳系行星的新定义, 将围绕太阳运转但不符合行星和矮行星条件的天体统称为小天体, 包括小行星、彗星、流星, 以及其他星际物质. 小行星(Asteroid)指围绕太阳运行, 体积和质量比行星和矮行星小, 且不易释放出气体和尘埃的天体^[1]. 主带彗星(Main Belt Comet), 又称活跃小行星(Active Asteroid), 是一类特殊小天体, 其轨道位于小行星带内, 但表现出类似彗星的活动特征, 释放气

引用格式: 张荣桥, 张焄, 刘建军, 等. 天问二号小天体探测任务. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279501

Zhang R, Zhang H, Liu J, et al. Tianwen-2 small bodies exploration mission (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 279501, doi: 10.1360/SSPMA-2025-0083

体或尘埃形成彗尾^[2].

小天体探测是当今深空探测的热点. 在科学方面, 一般认为小天体形成于太阳系早期(45亿年前), 自形成以后没有发生明显变化, 较完整地保留了原始太阳星云凝聚分馏和演化的历史, 是研究太阳系形成与演化的活化石. 在工程技术方面, 小天体质量小、引力微弱, 无法像大质量天体一样使探测器自然地围绕其形成环绕轨道, 对其实施遥感探测的轨道控制方法, 以及开展就位探测的控制、采样方式均不同. 因此, 开展小天体探测对推动行星科学发展和航天技术进步具有重大意义.

本文在回顾小天体探测国际发展历程的基础上, 详细介绍了天问二号任务的总体方案和科学探测规划, 分析了科学目标的可实现程度.

2 小天体探测的国际发展

2.1 任务实施情况

迄今, 美国、日本、欧空局3个国家(组织)专门针对小天体共实施了18次探测任务(另有9次其他天体探测任务顺路或在拓展任务期间对多个小天体进行了飞越探测), 多数任务获得了成功(2次失败, 4次在飞行途中). 日本和欧空局同在1985年以哈雷彗星飞越探测任务开启了各自的行星探测之门. 美国“星尘号(Stardust)”任务首次实现了彗星的绕飞、撞击、彗尾物质取样返回^[3], 日本的“隼鸟号”^[4]、“隼鸟二号”任务^[5]和美国的“欧西里斯-雷克斯(OSIRIS-REx)”任务^[6]完成了近地小行星的取样返回, 欧空局的“罗塞塔”任务实现了人类首次彗星软着陆^[7].

目前, 国际正在实施的小天体探测任务包括美国已完成小行星Bennu采样返回并向另一颗小行星Apo-phos飞行的“欧西里斯”任务(重命名为OSIRIS-APEX)^[8]、美国2021年发射正在飞向主小行星带途中的“露西(Lucy)”任务^[9]、美国2023年发射的“赛姬(Psyche)”任务^[10], 以及美欧合作2024年发射的小行星撞击和偏转评估(AIDA)任务中执行评估工作的“赫拉(Hera)”探测器^[11]; 另有日德合作的“命运+ (Destiny+)”任务, 计划于2028年发射.

2.2 小天体探测的主要科学问题

小天体探测的主要科学问题可以归纳为两个方面. (1) 涉及太阳系的起源与演化相关问题, 小行星

和彗星是太阳系中形成最早的天体之一, 且相比于类地行星, 它们是在形成后物理化学性质改变最少的原始天体, 保留了大量太阳系形成早期的证据; (2) 涉及小行星和彗星对地球的影响问题, 有人认为地球上的水和生命原初物质由小行星和彗星带来, 而撞击的风险又给现今人类的生存带来了挥之不去的阴影.

2.2.1 小行星及太阳系的起源与演化

(1) 小行星形成问题

截至2024年底, 已发现的小天体共计142万多颗(IAU小天体中心统计数据), 绝大多数位于火星和木星轨道之间, 距离太阳约3 AU, 称为主小行星带的位置^[12]. 根据提丢斯-波得定则(Titius-Bode Law), 在这个位置附近应该存在一个大行星, 轨道半长径为2.8 AU^[13]. 众多的小行星是由一颗大行星原行星子破裂而成, 还是由于某种原因尚未凝聚成一颗大行星, 这是行星科学研究的一个重要课题.

(2) 太阳系起源与演化问题

研究表明约80%的陨石是原始球粒陨石, 形成于太阳系早期(45亿年前), 自形成以后没有发生明显变化, 较完整地保留了原始太阳星云凝聚分馏和演化的历史. 少数陨石(如铁陨石、石铁陨石和非球粒陨石)的年龄与球粒陨石相仿, 也是形成于45亿年以前的太阳系原始阶段, 但它们是岩浆熔融分异的产物. 这说明在太阳系形成的初期, 有些小行星内部发生过熔融分异过程, 与类地行星类似形成了核、幔、壳的结构. 为什么有些小行星在太阳系形成初期内部发生了熔融分异, 而有些小行星却在形成以后没有发生重大的地质过程, 是什么物理机制使小行星内部发生了熔融现象, 内部发生熔融分异过程的小行星在太阳系内的空间和时间上的分布规律是什么, 对这些问题的研究是揭开太阳系起源与演化之谜的钥匙^[14].

2.2.2 小行星和彗星对地球的影响

(1) 地球生命的起源问题

研究表明, 地球形成早期的环境无法保留水, 一种假说认为地球的水是地球演化到一定阶段后由彗星撞击地球带来的, 并成为孕育地球生命的关键条件. 以往的探测表明, 小行星含有有机成分, 蕴含恒星物质, 很可能是导致地球生命形成的有机物的来源. 这些假说为研究地球生命起源提供了新思路, 为认识恒星演化

及其与行星形成的关系提供了新线索^[15].

(2) 小行星撞击地球的风险及防御

小行星撞击地球导致恐龙的灭绝已经成为科学界的主流认识, 近年来发生的多次流星空爆甚至引起人员伤亡事件不断提醒人们这种来自太空的巨大灾变风险. 小行星和彗星质量小, 轨道容易受到各种外部因素的影响, 其自转速率、自转轴的指向、密度、形状、表面温度长期变化规律是轨道演化的重要因素. 由于目标很小且很暗, 地面天文观测很难准确测定这些物理参数, 特别是对那些直径小于1 km而数量巨大的小行星, 只有通过近距离探测, 才能有效获得相关信息. 认知这些因素的变化及其影响效应, 是研究小行星轨道动力学演化并提出撞击风险应对措施的基础^[16].

2.3 小天体探测的工程特点

(1) 目标特性不确定性大

受观测能力的限制, 地面观测小天体仅能获得初步的轨道和光谱信息, 自转、大小、形态这些基本信息难以准确获知. 因此, 小天体探测, 特别是着陆和采样, 与月球、火星等行星探测在地面基本制定好详细任务流程的方式完全不同, 只能采取边飞、边探、边制定行动策略的方式进行. 为了适应可能出现的各种情况, 任务的鲁棒性要求很高.

(2) 自主控制要求高

小天体体积小、星等弱, 地面观测对小天体的定轨精度以及地面测控对探测器定轨的精度, 都不足以支持探测器与小天体的接近、交会等轨道控制精度要求, 需要探测器采取自主的相对导航制导与控制, 逐步调整逼近目标, 完成非合作目标的接近与交会. 对于采样任务, 受通信时延以及可能的局部遮挡的影响, 也必须由探测器自主完成.

(3) 控制的精确性要求高

小天体引力微弱, 对于遥感探测, 探测器不能依靠小天体的引力而形成自然绕飞轨道, 伴飞小天体需要探测器通过精确的轨道控制实现与目标同步, 绕飞小天体则需要通过精确的主动控制实现. 对于采样, 弱引力无法自然拉近探测器, 坚硬表面易造成探测器反弹, 而松散表面又难以阻止探测器下陷. 对于附着, 坚硬表面无力可借, 松散表面又无处着力. 完成伴飞、附着、采样, 要求探测器的控制必须足够精确地恰到好处.

目前国外已实施的小天体采样任务, 成功实践过

两种采样方式: 一是日本“隼鸟号”、“隼鸟二号”任务, 通过发射高速弹丸撞击小行星溅射起星表颗粒, 探测器利用喇叭形装置近距离收集样品并迅速飞离; 二是美国的“欧西里斯-雷克斯”任务, 采用触碰采样方式, 采样器短时接触(6 s)小行星表面, 同时用高速喷出的氮气将小颗粒样品吹入收集器中, 然后迅速飞离. 这两种方式控制相对简单, 但样品收集量不确定性大. 而对于小天体稳定附着, 目前仅有欧空局的“罗塞塔”任务释放“菲莱”探测器尝试, 但没有实现稳固锚定, 着陆器翻入彗星表面的阴影区, 很快失去了电力. 与大质量行星探测不同, 对小天体的稳定附着难于采样, 目前人类尚未做到在小天体表面的稳定附着.

综上, 小天体探测将带动我国行星探测精巧类探测技术的发展.

3 天问二号任务总体方案

3.1 工程目标

牵引科学与技术协调发展, 通过一次任务完成近地小行星伴飞探测、采样返回和主带彗星伴飞探测, 实现探测方式和核心技术的突破, 达到国际同期先进水平. 具体包括:

(1) 突破微引力天体表面采样、高精度相对自主导航与控制、轻小型超高速再入返回、多模式长寿命高可靠电推进等关键技术;

(2) 实现近地小行星伴飞探测、采样(触碰/悬停/附着)返回, 及对主带彗星伴飞探测, 为小行星起源及演化等前沿科学研究提供探测数据和样品.

3.2 科学目标

(1) 测定近地小行星和主带彗星的轨道参数、自转参数、形状大小、热辐射特性等物理参数, 开展轨道动力学研究;

(2) 开展近地小行星和主带彗星的形貌、物质组分、内部结构以及可能的喷发物等研究;

(3) 开展返回样品的实验室分析研究, 测定样品物理性质、化学与矿物成分、同位素组成和结构构造, 开展小行星和太阳系早期的形成与演化研究.

3.3 有效载荷配置

天问二号根据科学目标研究需求配置10台科学载

荷^[17]和1台搭载载荷(如图1), 包括窄视场导航敏感器、激光一体化导航敏感器、中视场彩色相机(光学成像探测)、热辐射光谱仪、可见红外成像光谱仪、多光谱相机、旋转衍射高光谱相机(光谱探测)、探测雷达(内部结构探测)、磁强计、带电粒子与中性粒子分析仪(空间环境探测)、喷发物分析仪(成分探测)。

3.4 飞行方案

天问二号任务于2025年5月在西昌卫星发射中心使用长征三号乙改二型(CZ-3B/G2)运载火箭发射, 约两年半完成近地小行星2016 HO₃的伴飞探测和取样返回, 之后飞行约7年到达主带彗星311P并开展伴飞探测(如图2)。

天问二号任务飞行阶段划分具体如表1所示。从运载发射段(第1阶段)至再入回收段(第9阶段)为近地小行星2016 HO₃探测阶段, 从主带彗星转移段(第10阶段)至主带彗星近距探测段(第13阶段)为主带彗星311P探测阶段。

3.5 关键技术

天问二号任务需要突破高精度相对自主导航与控

制、适应不同目标特性的微重力环境多方式采样、长时间小推力转移轨道设计与控制、轻小型超高速再入返回等核心关键技术。

小行星表面为微引力环境(约 $10^{-5}g$), 逃逸速度很低。对目标小天体的自转周期、地形地貌、表面状态等物理特性等先验知识很少, 这些信息需通过近距离探测边飞行边确定。天问二号任务设计了高精度相对自主导航与控制, 以满足小行星微引力、不确定环境下的近距离伴飞探测和悬停、触碰采样需求。

依据地面观测数据无法定量评估2016 HO₃表面的机械力学特性。天问二号任务设计了适应多种目标特性的多种采样方式, 针对砂石堆型松散结构表面采用触碰采样, 针对坚硬表面的风化层颗粒采用悬停采样, 在条件许可的情况下实施附着采样, 获取更丰富的样品。受星体遮挡和时延的影响, 地面无法实时监测探测器采样过程的状态, 探测器需自主实施采样控制和故障应对措施, 智能应对风险。

完成2016 HO₃采样返回后, 主探测器将通过地球借力, 继续飞行至主带小天体开展科学探测, 全程约需8 km/s的速度增量。在重量、功率和飞行时间等多约束条件下, 小行星探测任务选择了高比冲的离子电推

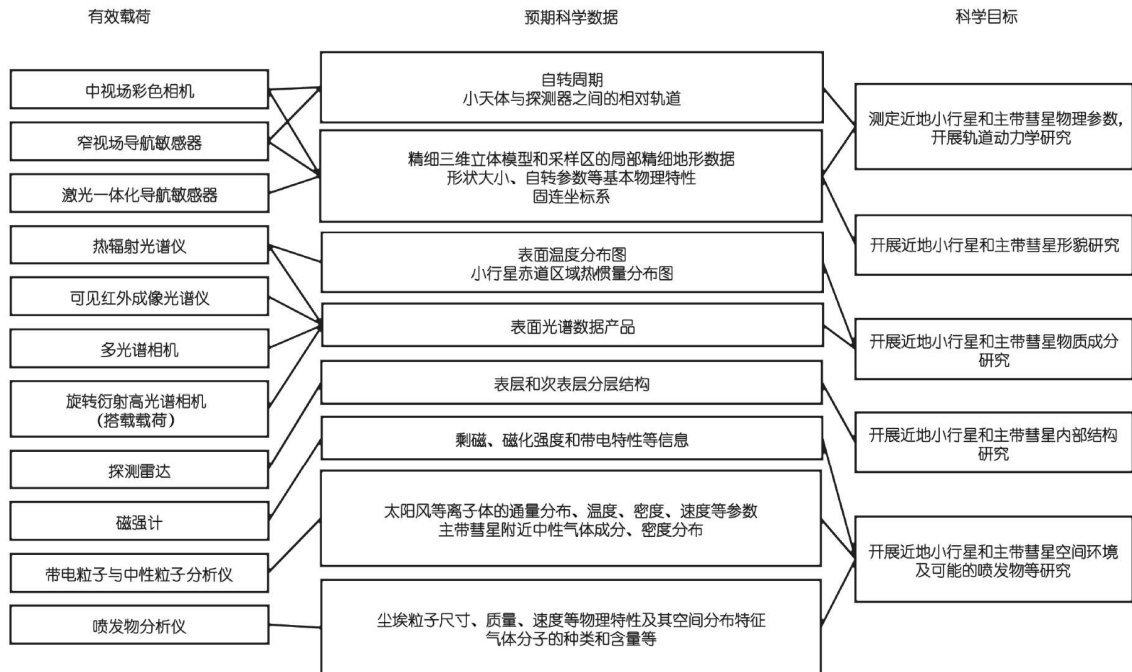


图 1 有效载荷、预期科学数据及科学目标

Figure 1 Payloads, expected scientific data, and scientific objectives.

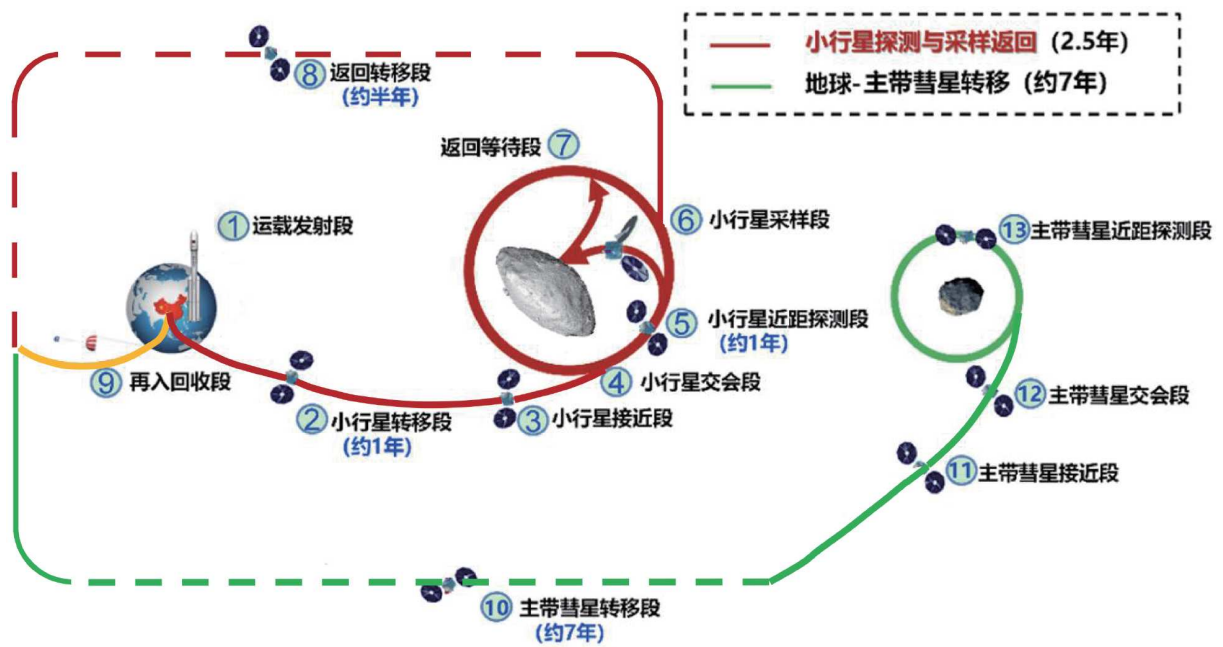


图 2 天问二号任务飞行流程示意图
Figure 2 The flight process schematic diagram of the Tianwen-2 mission.

表 1 天问二号探测器飞行阶段划分
Table 1 Flight phases of Tianwen-2 probe

序号	飞行阶段	阶段定义	
		起始点	结束标志点
1	运载发射段	发射	器箭分离
2	小行星转移段	器箭分离	距离小行星约30000 km
3	小行星接近段	距离小行星约30000 km	距离小行星约2000 km
4	小行星交会段	距离小行星约2000 km	小行星交会段结束, 与小行星表面距离降至20 km
5	小行星近距离探测段	探测器与小行星表面距离降至20 km	完成采样点的选取, 探测器回到距离小行星3 km停泊点
6	小行星采样段	从距离小行星3 km位置开始下降实施首次下降演练开始	完成全部采样工作, 探测器回到距离小行星3 km停泊点
7	返回等待段	探测器采样完, 复飞至距离小行星3 km高度	探测器实施返回机动前
8	返回转移段	探测器实施返回机动	主探测器与返回舱分离
9	再入回收段	返回舱与主探测器分离	着陆成功回收
10	主带彗星转移段	主探测器与返回舱分离	距离主带彗星约100000 km
11	主带彗星接近段	距离主带彗星约100000 km	距离主带彗星约2000 km
12	主带彗星交会段	距离主带彗星约2000 km	与主带彗星表面距离降至20 km
13	主带彗星近距离探测段	与主带彗星表面距离20 km	主探测器完成科学探测任务, 寿命结束

进系统, 有效节省探测器燃料, 实现长时间小推力转移。离子推进系统比冲高但推力小, 需基于连续小推力工作, 结合推力精度与姿控精度、推力器工作时间与探测器能源获取、地面观测定轨能力等多重约束,

开展轨道控制策略的设计.

返回舱与主探测器分离后以12 km/s的速度弹道式再入大气, 需承受12 MW/m²的最大热流, 以及315 MJ/m²的最大加热量, 并在约2马赫的速度下开伞, 对返回舱的隔热、隔热、结构强度以及气动过程的稳定性等设计均提出了大大超过以往任务的要求. 为同时满足地球大气再入过程的减速阻力、飞行稳定性、气动加热等约束, 设计了球锥大底+单锥后体构型, 将实现我国首次超第二宇宙速度地球再入.

4 科学探测

4.1 近距离探测规划

天问二号任务科学数据的获取主要集中在小行星近距离探测段. 由于观测数据有限, 目前对小行星基本属性的先验认识还十分不足, 小行星近距探测按边飞边探、逐步逼近的原则开展, 由20 km至300 m逐步接近小行星, 开展伴飞和主动绕飞探测. 综合考虑有效载荷的技术指标及对光照的需求, 在距离小行星不同高度(20 km, 3 km, 600 m, 300 m), 不同纬度(赤道、南北纬30°、40°、60°、90°), 不同观测相角(-90°, -30°, 7.5°, 45°和90°)设计多个测站, 以星下点探测为主(指向小行星质心), 辅以多个角度侧摆探测的方式获取观测数据, 如图3所示. 在轨期间, 将根据小行星的三维建模结果, 完善和调整测站的具体位置.

基于上述飞行阶段和测站设置, 各有效载荷的科学探测总体规划如下.

小行星转移段、返回转移段以及主带彗星转移段期间, 有效载荷进行自检、在轨定标, 带电粒子与中性粒子分析仪、磁强计(自返回转移段开始)等载荷开机探测.

小行星转移段初期, 利用中视场彩色相机和窄视场导航敏感器获取地球、月球的彩色和全色图像.

小行星接近段、交会段, 利用中视场彩色相机、窄视场导航敏感器等载荷择机对小行星进行成像, 用于测定小行星自转周期, 以及与探测器之间的相对轨道.

20 km距离处(图3(a)), 利用中视场彩色相机、窄视场导航敏感器等载荷的图像数据解算小行星的自转轴、自转速度等自转参数, 确定小行星赤道面, 初步建立小天体固连坐标系, 为测站设置提供基础. 同时, 验证有效载荷在轨探测性能, 为有效载荷工作模式、参

数设置等提供依据.

3 km距离处(图3(b)和(c)), 开展光学成像探测类、光谱探测类载荷对小行星的全球探测, 初步构建小行星三维模型, 分析小行星表面物质成分.

600 m距离处(图3(d)), 利用光学成像探测类载荷图像数据进行小行星精细三维建模, 确定2016 HO₃本初子午线位置, 完善小天体固连坐标系. 同时, 开展热辐射光谱仪和探测雷达的探测, 探测小行星表面的热辐射特性, 获取小行星次表层结构信息, 为采样区选取提供支撑.

300 m距离处(图3(e)), 重点开展光学成像探测类、光谱探测类载荷对采样区详细探测, 对采样区进行精细三维建模和物质成分分析.

小行星采样段下降过程中, 将获取采样区的精细彩色图像和地形数据, 为小行星样品分析提供背景信息.

整个小行星近距离探测期间, 带电粒子与中性粒子分析仪、磁强计等载荷在满足各距离科学探测任务的基础上开机探测, 获取小行星空间环境信息.

主带彗星交会段, 喷发物分析仪开机探测, 进行主带彗星附近气体分子以及空间尘埃探测.

主带彗星近距离探测期间, 除激光一体化导航敏感器之外的其他有效载荷均开机探测, 开展主带彗星311P物理特性、形貌、结构与成分、轨道动力学、喷发物与空间环境等方面的研究.

4.2 小行星采样规划

设计了悬停、触碰、附着三种采样方式, 以适应2016 HO₃可能的松散碎石堆或坚硬独石结构.

(1) 悬停采样

探测器展开机械臂, 缓慢逼近小行星, 到达采样点上空30 m时匹配小行星自转, 继续垂直下降到距小行星表面约1 m高度时悬停, 机械臂垂直下探使其端头插入小行星表面, 采集表层风化物颗粒, 同时获得表面力学特性.

(2) 触碰采样

探测器伸展触碰采样机构, 下降过程与悬停采样相同. 到达约1 m高度时, 盘状激励采样头接触小行星表面, 采样头内部相对旋转的一对毛刷卷起样品颗粒, 同时压力气瓶释放高速气体将样品输送至样品容器.

(3) 附着采样

若确认采样区域星壤承载强度和地形地貌满足附

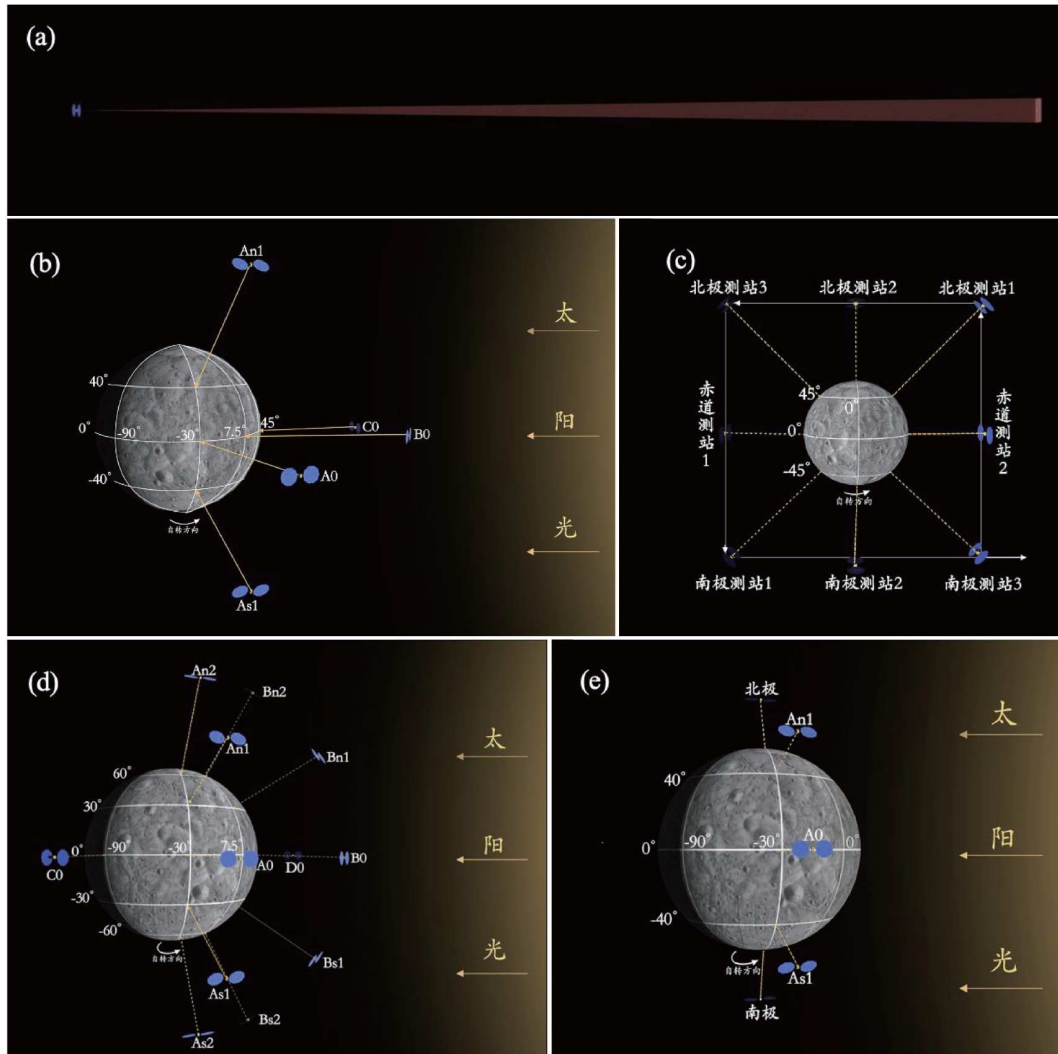


图 3 20 km至300 m距离探测站点位置示意图. (a) 20 km测站; (b) 3 km测站; (c) 3 km主动掠飞测站; (d) 600 m测站; (e) 300 m测站. 蓝色图形表示探测器, A0, An1, As1, B0, Bn1和Bn2等位置分别代表不同的探测站点

Figure 3 Location diagram of investigation stations from 20 km to 300 m. (a) 20 km investigation stations; (b) 3 km investigation stations; (c) 3 km active flyover stations; (d) 600 m investigation stations; (e) 300 m investigation stations. The blue graphs represent probes, with positions A0, An1, As1, B0, Bn1, and Bn2 representing different investigation stations.

着采样的条件, 则实施附着采样. 探测器展开3个缓冲腿和触碰采样机构, 展开机械臂为锚固准备状态, 下降过程与悬停采样相同. 到达约1 m高度时缓冲腿接触表面, 启动发动机喷气下压探测器, 利用机械臂端头的爪刺结构锚固小行星表面, 之后由触碰采样机构采样, 获取表面风化物样品.

5 科学目标可实现程度分析

为了保证天问二号任务的顺利实施, 开展了有效

载荷地面科学验证试验, 全面评估了有效载荷的探测能力, 验证了在轨工作模式, 评价了数据质量, 验证了数据处理方法. 结合目前的科学探测规划, 在轨探测期间预期能够实现各项科学目标, 为返回样品的实验室分析研究提供基础.

利用光学成像探测类载荷获取的厘米尺度高分辨率图像数据, 测定小行星和主带彗星的自转周期, 利用相对导航敏感器测定小行星和主带彗星与探测器之间的相对轨道, 重构小行星亚米分辨率的精细三维立体模型, 测定小行星的形状大小、自转参数等基本物理

特性, 构建小行星固连坐标系. 利用热辐射光谱仪获取的 $5.0\text{--}50.0\ \mu\text{m}$ 热辐射光谱数据, 制作小行星和主带彗星表面温度分布图, 以及小行星赤道区域热惯量分布图, 进而分析小行星表面结构和粒径大小, 同时, 热辐射光谱仪获取的表面温度分布数据可加深对雅科夫斯基效应的理解, 服务于小行星轨道动力学研究. 可实现测定近地小行星和主带彗星的轨道参数、自转参数、形状大小、热辐射特性等物理参数, 开展轨道动力学研究的科学目标.

利用光学成像探测类载荷获取的厘米尺度高分辨率图像数据, 以及构建的亚米分辨率小行星全球三维立体模型和厘米分辨率局部精细地形数据, 提取目标小行星环形坑等典型地貌特征, 计算形态特征参数信息; 利用光谱探测类载荷获取 $0.45\text{--}4.50\ \mu\text{m}$ 可见近红外高光谱数据、 $5.0\text{--}50.0\ \mu\text{m}$ 热红外光谱数据, 以及 $480\text{--}1000\ \text{nm}$ 多光谱数据(8谱段), 开展主要硅酸盐矿物及可能的含水矿物类型与分布特征研究; 利用探测雷达获取的低频中心频率 $150\ \text{MHz}$ 和中心频率 $900\ \text{MHz}$ 的回波数据, 开展小行星内部结构探测和成像; 利用磁强计获取的分辨率为 $0.01\ \text{nT}$ 的剩磁和磁化强度, 以及带电粒子与中性粒子分析仪获取的质量数范围为 $1\text{--}150\ \text{amu}$ 的中性大气和离子、能量范围为 $5\ \text{eV}\text{--}30\ \text{keV}$ 的离子, 以及能量范围为 $5\ \text{eV}\text{--}10\ \text{keV}$ 的电子等空间环境信息, 为研究主带彗星大气层和电离层形成与演化、主带彗星的活动性驱动力起源和机制, 以及太阳风与彗星和小行星的相互作用提供基础; 利用喷发物分析仪获取的主带彗星上可能的质量范围为 $1\times 10^{-10}\text{--}4\times 10^{-1}\ \text{g}$ 的尘埃粒子, 质量数探测范围为 $1\text{--}150\ \text{amu}$ 的喷发物的物理特性和空间分布特征, 回答主带彗星的起源和形成、主带彗星气体活动机制、非活跃期主带彗星的特性等问题. 可实现开展近地小行星和主带彗星的形貌、物质组分、内部结构以及可能

的喷发物等研究的科学目标.

6 总结与展望

我国行星探测工程的总体目标是要在2030年前后构建起太阳系探测的基本工程能力, 带动行星科学的发展进步. 天问二号任务是我国行星探测工程的重要组成部分, 是对太阳系未知领域的又一次勇敢探索.

飞行任务实施中, 天问二号将经历一系列复杂的飞行控制过程, 包括发射、转移、接近、伴飞、取样和返回等, 每个阶段都需要精确的时序控制和精细的轨道调整, 以确保探测器能够按照预定的科学目标进行操作. 特别是在小行星伴飞和取样阶段, 探测器需要在极近距离上详细观测小行星, 并且采用触碰、悬停和附着多种采样技术以适应小行星表面特性的不确定性, 这不仅对探测器的自主性与鲁棒性提出了极高的要求, 也对地面控制团队的实时决策能力提出了新的挑战.

天问二号的科学研究预计将在多个领域取得突破. 在小行星的起源与演化方面, 通过样品分析有望揭示小行星的形成历史和演化过程; 在太阳对小天体的影响方面, 通过探测小行星的空间粒子和磁场分布, 有助于理解太阳风和小天体的相互作用; 在小行星轨道演变方面, 通过研究小行星的轨道动力学演化来探究小天体对地球的潜在危害.

综上所述, 太阳系小行星探测具有以下特点: 目标繁多、特性千差万别; 以往探测样本稀少, 蕴含更多潜在的重大原创科学发现机会; 探测手段多样; 工程实现复杂; 技术带动性突出. 天问二号将通过一次任务实现近地小行星采样返回和主带彗星近距离探测, 构建智能化、精巧化的行星探测能力, 推动我国精细航天技术发展, 推动行星科学的发展进步, 实现重大原创科学发现.

致谢 感谢天问二号任务全体参研参试人员的大力支持.

参考文献

- 1 GB/T 30114.4-2014. Terminology for Space Science and Application—Part 4: Lunar and Planetary Science (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2013 [GB/T 30114.4-2014. 空间科学及其应用术语——第4部分: 月球与行星科学. 北京: 中国标准出版社, 2013]
- 2 Hsieh H H, Jewitt D. A population of comets in the main asteroid belt. *Science*, 2006, 312: 561–563
- 3 Westphal A J, Stroud R M, Bechtel H A, et al. Evidence for interstellar origin of seven dust particles collected by the Stardust spacecraft. *Science*,

2014, 345: 786–791

- 4 Fujiwara A, Kawaguchi J, Yeomans D K, et al. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa. *Science*, 2006, 312: 1330–1334
- 5 Tsuda Y, Yoshikawa M, Abe M, et al. System design of the Hayabusa 2—Asteroid sample return mission to 1999 JU3. *Acta Astronaut*, 2013, 91: 356–362
- 6 Lauretta D S, Balram-Knutson S S, Beshore E, et al. OSIRIS-REx: Sample return from asteroid (101955) Bennu. *Space Sci Rev*, 2017, 212: 925–984
- 7 Auster H U, Richter I, Glassmeier K H, et al. Magnetic field investigations during ROSETTA's 2867 Šteins flyby. *Planet Space Sci*, 2010, 58: 1124–1128
- 8 NASA. Explorers and Heliophysics Projects Division. OSIRIS-REx Factsheet. Washington: NASA, 2011
- 9 SWRI. Lucy mission overview. 2018-06-25, <http://lucy.swri.edu/mission/Overview.html>
- 10 NASA. Solar system exploration: In depth Psyche mission. 2023-01-03, https://www.nasa.gov/mission_pages/psyche/overview/index.html
- 11 Cheng A F, Rivkin A S, Michel P, et al. AIDA DART asteroid deflection test: Planetary defense and science objectives. *Planet Space Sci*, 2018, 157: 104–115
- 12 Wetherill G W. An alternative model for the formation of the asteroids. *Icarus*, 1992, 100: 307–325
- 13 Ray S, Sanyal A, Sharma U K, et al. Revisiting the Titius-Bode law: Planetary distances with advanced data analysis for better physical significance. *J Korean Astron Soc*, 2024, doi: 10.21203/rs.3.rs-4270245/v1
- 14 Michel P, DeMeo F E, Bottke W F. Asteroids: Recent Advances and New Perspectives. Asteroids IV. Tucson: University of Arizona Press, 2015
- 15 Küppers M, O'Rourke L, Bockelée-Morvan D, et al. Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres. *Nature*, 2014, 505: 525–527
- 16 Wheeler L, Dotson J, Aftosmis M, et al. Risk assessment for asteroid impact threat scenarios. *Acta Astronaut*, 2024, 216: 468–487
- 17 Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2024, 11: 304–310 [李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置. 深空探测学报, 2024, 11: 304–310]

Tianwen-2 small bodies exploration mission

ZHANG Rongqiao¹, ZHANG He^{2*}, LIU Jianjun^{3*}, GENG Yan¹, MENG Linzhi²,
LI Haitao⁴, YU Tianyi⁵ & XUE Changbin⁶

¹ Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China

² Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology (CAST), Beijing 100094, China

³ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

⁴ Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

⁵ Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China

⁶ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

*Corresponding authors (ZHANG He, email: zhanghe_maoqiu@163.com; LIU Jianjun, email: liujj@nao.cas.cn)

Small bodies exploration in the solar system has emerged as a frontier in contemporary deep-space exploration. The Tianwen-2 small bodies exploration mission, as an important part of China's planetary exploration program, represents a groundbreaking endeavor to probe uncharted territories of the solar system. Here, we systematically reviewed the development history, major scientific issues, and engineering characteristics of the international asteroid exploration, and focused on the engineering objectives, scientific goals, payload configuration, flight plan, and key technologies of the Tianwen-2 mission. Detailed designs were provided for the proximity investigation and sampling plan of the asteroid 2016 HO₃, and the achieving feasibility of scientific objectives was analyzed. The Tianwen-2 mission will execute a dual-objective exploration in a single flight: conducting rendezvous and proximity observation of the near-Earth asteroid 2016 HO₃ followed by sample return, and performing rendezvous exploration of main-belt comet 311P. This mission is expected to make breakthroughs in engineering technology, and promote the development in both planetary exploration capabilities and planetary science.

Tianwen-2, small bodies exploration, general design

PACS: 95.55.Pe, 96.25.-f, 84.40.Xb

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0083](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0083)