

冰巨星环绕探测任务分析及实施建议

杨孟飞¹, 高峰^{2,*}, 孟文沁², 李晖³, 王宇贤³, 白梵露², 王彤²

1. 中国空间技术研究院, 北京 100094

2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

3. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190

摘要:冰巨星作为最接近太阳系边缘的行星, 保存了大量太阳系形成初期的原始气体, 包含了原恒星云的状态条件和行星形成的位置信息, 是研究太阳系和系外行星的蓝本。针对冰巨星环绕探测任务, 对国外相关探测方案进行了系统调研分析, 梳理了冰巨星环绕探测的主要技术难点, 并结合冰巨星及其卫星系统的科学问题, 提出了中国实施冰巨星环绕探测的发展建议。针对冰巨星的探测任务, 其科学价值集中体现在揭示冰巨星内部结构和形成演化, 研究冰巨星的奇异磁场和复杂多变的空间环境以及探寻海卫一冰下海洋及生命信号。研究发现, 冰巨星环绕探测主要面临远距离能源供给、测控通信、智能自主、高精度轨道设计等技术挑战。相关研究成果可为中国后续冰巨星环绕探测任务的规划与论证提供理论支持和决策参考。

关键词:冰巨星; 天王星; 海王星; 行星探测; 太阳系

中图分类号: V529. 1

文献标识码: A

Analysis and implementation recommendations for ice giant orbital exploration missions

YANG Mengfei¹, GAO Feng^{2,*}, MENG Wenqin², LI Hui³, WANG Yuxian³, BAI Fanlu², WANG Tong²

1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

3. National Space Science Center, Beijing 100190, China

Abstract: As the planets situated closest to the edge of the solar system, the ice giants preserve a significant amount of primordial gases from the early stages of the solar system's formation, which contains valuable information about the conditions of the original protoplanetary nebula and the locations of planetary formation. Ice giants serve as a key reference for the study of both the solar system and exoplanets. This study systematically reviews and analyzes foreign exploration proposals for ice giant orbiting missions, identifies the main technical challenges associated with these missions; and based on the scientific questions about the ice giants and their satellite systems, offers development recommendations for China's implementation of ice giant orbiting exploration. The scientific value of ice giant exploration lies in its potential to reveal their internal structure and formation history, their unusual magnetic fields and complex, variable space environments, as well as the investigation of Triton's subsurface ocean and potential biosignatures. Key technical challenges are identified in the study, including long-distance energy supply, tracking and communication, autonomous intelligence, and high-precision orbital design. The theoretical support and decision-

收稿日期: 2025-03-18; 修回日期: 2025-04-11; 录用日期: 2025-04-21

* 通信作者. E-mail: 13810732516@163. com

引用格式: 杨孟飞, 高峰, 孟文沁, 等. 冰巨星环绕探测任务分析及实施建议[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2025, 45(4): 12-22.

YANG M F, GAO F, MENG W Q, et al. Analysis and implementation recommendations for ice giant orbital exploration missions[J].

Chinese Space Science and Technology, 2025, 45(4): 12-22 (in Chinese).

making guidance for China's future planning and implementation of ice giant orbiting exploration missions are provided by the findings of this research.

Keywords: ice giants; Uranus; Neptune; planetary exploration; the solar system

0 引言

作为太阳系中距离太阳较远的冰巨星,天王星和海王星保存了大量原始气体物质。这些物质记录了原恒星云的演化状态和行星形成的关键信息,是研究太阳系起源及系外行星的重要研究对象^[1-2]。天王星是太阳系内大气温度最冷的行星,大气层最低温度约 49 K,具有各大行星中最倾斜的自转轴,倾斜角度达到 97.77°。海王星作为距离太阳最远的行星,具有最强的表面风暴,风速高达 2 100 km/h^[3-4]。此外,海卫一(Triton)作为海王星最大的卫星,被认为是最优先的“候选海洋世界”,也是“太阳系中最可能存在微生物活动的地外天体”,有可能为生命起源这一重大科学问题提供关键线索^[5]。因此,冰巨星及其行星系统探测已成为当前国际深空探测领域的热点,多次被列入欧美等国航天规划中^[6]。随着中国深空探测能力的提升以及基于核电源的空间能源技术取得重要进展,已初步具备实施冰巨星环绕、进入探测的能力,应推动并力争在国际上首次实现人类对冰巨星的环绕探测。

1 冰巨星探测的科学问题

1.1 冰巨星内部结构和形成演化

冰巨星的形成与演化是行星科学研究的前沿热点之一,也是太阳系中探索程度最低的世界之一。冰巨星的独特性质对现有的行星形成理论提出了重大挑战,如现有理论难以充分解释冰巨星的质量及其气体-固体比^[7-8]等。因观测数据有限,目前对于天王星和海王星的组成和内部结构的认知主要依赖于行星结构模型,而这些模型因约束条件不足而存在较大不确定性^[9]。此外,天王星和海王星之间存在明显差异,如轴向倾斜角度、内部热流和卫星系统等,这些差异可

能源于行星形成后的巨大撞击,这进一步增加了冰巨星内部结构和形成演化的复杂性^[10-11]。为了更准确地理解这些问题,需要对冰巨星的重力场、磁场、大气组成和同位素等进行详细测量。

1.2 冰巨星的奇异磁场和复杂多变的空间环境

旅行者 2 号的原位探测数据表明,天王星和海王星具有高度不对称、偏离行星中心、显著倾斜且快速旋转的内禀磁场。相较于太阳系其他行星,冰巨星磁场呈现出显著的非偶极特征和巨大夹角^[12-14],而对冰巨星的高阶磁场信息及其动态变化的理解则十分有限。冰巨星的奇异磁场造就了太阳系中最不对称且动态变化剧烈的行星磁层^[15-16]。除了磁场特性和太阳风的差异外,天王星和海王星磁层也因各自独特的自转特性以及海卫一的存在而表现出明显不同^[7,15]。有科学研究认为,海卫一拥有太阳系独特的电离层,由太阳辐射和磁层粒子沉降共同主导,是海王星磁层的主要物质来源^[17]。总的来说,需要深入探究的关键问题包括磁层是否能达到平衡状态、内部等离子体源对磁层的影响以及奇异的磁场位形如何影响磁层中的磁场重联等。

1.3 海卫一冰下海洋及生命信号探寻

海卫一作为海王星最大的卫星,因其独特的逆行轨道及可能源自柯伊伯带的背景而成为太阳系中一个极为独特且重要的研究对象。海卫一不仅富含氮、磷等关键生命元素,还显示出存在冰下海洋的潜在迹象,使其成为了探索生命信号和宜居性的热点目标之一^[7]。通过探测海卫一的磁场、重力场及其地形特征等信息,可以间接确定冰下海洋的存在性并探究冰层的厚度。旅行者 2 号的观测数据显示,海卫一表面地质活动频繁,并存在活跃的间歇性冰火山现象^[18],通过分析冰火山喷发的物质,可以尝试探寻与生命相关的有机分子和其他重要元素,从而揭示海卫一地下环境的化学特性。

1.4 小结

冰巨星及其卫星系统是太阳系中研究最为不足但科学价值极高的领域之一。对冰巨星的探测涵盖了行星内部结构和形成演化、奇异磁场特性和复杂多变的空间环境以及海卫一冰下海洋及生命信号探寻等关键科学主题,亟需获取有关其内部结构、大气成分、空间环境和海卫一冰下海洋性质等关键数据。因此,实施一项配置有多类科学仪器并能够进行长期、多轨道探测的冰巨星环绕探测任务势在必行。

表 1 冰巨星探测任务总结
Table 1 Summary of ice giant exploration missions

任务名称	研制机构	提出时间	任务状态	主要目标
旅行者 2 号(Voyager 2) ^[6]	NASA	1977 发射	已实施	分别首次飞掠天王星和海王星,提供了宝贵的数据
新视野二号(New Horizons 2) ^[19]	NASA	2002	未执行	飞掠木星、天王星与外海王星天体进行探测
阿尔戈号(Argo) ^[20]	NASA	2009	已取消	飞掠木星、土星、海王星、海卫一、探测柯伊伯带星体
奥迪努斯(ODINUS) ^[21]	ESA	2013	提案阶段	双生探测器计划,分别环绕天王星与海王星探测
特里同跳跃者 (Triton Hopper) ^[22]	NASA	2015	提案阶段	海卫一着陆探测
QUEST 任务 (Quest to Uranus to Explore Solar System Theories) ^[23]	NASA	2018	2018 年行星科学 夏季研讨会提案	低成本天王星轨道器任务,研究天王星的磁层、大气层和内部结构
三叉戟号(Trident) ^[24]	NASA	2019	提案阶段	飞掠木星和海王星,重点探测海卫一
海王星奥德赛 (Neptune Odyssey) ^[25]	APL	2020	提案阶段	环绕海王星并释放大气探测器,以深入研究海王星及其卫星
海卫一海洋世界勘测者号 (Triton Ocean World Surveyor, T-OWS) ^[26]	NASA,APL	2021	提案阶段	进行 35~45 次海卫一飞掠,探测其内部结构、大气成分和磁层相互作用
天王星轨道器与探测器 (Uranus Orbiter and Probe, UOP) ^[27]	NASA	2022	已纳入计划	环绕天王星并释放大气探测器,研究其内部结构、大气特性、磁层及其卫星
鹦鹉螺号(Nautilus) ^[28]	JPL	2023	提案计划	重点探测海卫一

考虑以上任务目前研究进展,以及与环绕探测的契合度,以下将就天王星轨道器与探测器、海王星奥德赛和奥迪努斯 3 次典型冰巨星环绕探测任务进行详细介绍。

2 冰巨星环绕探测任务研究进展

冰巨星探测具有特殊且重要的科学意义,但到目前为止,国内外仅美国旅行者 2 号实施了冰巨星飞掠探测,实现冰巨星环绕并开展长期观测等更精细探测任务仍处于空白。国际上针对冰巨星探测提出了多种任务设想,旨在深入探测冰巨星,揭示其内部结构、大气动力学、磁场特性以及卫星的潜在宜居性等。表 1 对国内外提出过的冰巨星探测任务进行了总结。

2.1 天王星轨道器和探测器 UOP^[29-33]

(1)任务概述

天王星轨道器和进入器(Uranus Orbiter &

Probe,UOP)是 NASA 提出的旗舰级任务概念,旨在探索天王星及其卫星系统。该任务已被选为 NASA“2023—2032 行星科学十年调查”的最高优先级任务。最初提案计划于 2031 年使用猎鹰重型运载火箭发射,借助木星引力辅助,于 2044 年抵达天王星。然而,2023 年 NASA 宣布,由于钚产量不足,任务更有可能在 21 世纪 30 年代中后期发射。天王星轨道器和探测器如图 1 所示。

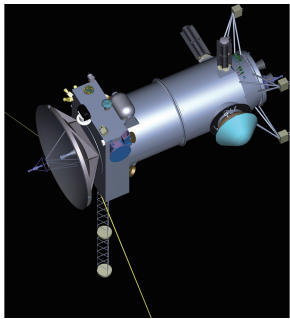


图 1 天王星轨道器和探测器示意^[30]
Fig.1 Uranus orbiter & probe concept diagram

(2)任务目标

UOP 任务的科学目标涵盖 3 个主要方面:起源、过程和宜居性。具体包括确定天王星在行星盘中形成的时间和地点,研究天王星与海王星是否发生过迁移或位置交换,探究导致天王星轴向倾斜及内部结构重塑的原因,揭示天王星系统各组成部分之间的相互作用机制,分析改变行星、卫星和环构成的外部因素,评估天王星卫星过去和现在是否存在海洋,以及研究冰巨星在系外行星系统中的形成和演化机制。此外,该任务还将深入分析太阳风与天王星磁层耦合的机理,这将有助于深入探索太阳物理学,并了解系外行星系统的形成和演化提供关键数据。这些研究领域与“2023—2032 年行星十年调查”提出的科学问题高度契合,有望显著提升对太阳系和地外行星系统的理解。

(3)载荷配置

UOP 任务轨道器将携带磁力计、窄视场相机、热红外相机、朗缪尔探针和波传感器、快速成像等离子体能谱仪、静电分析仪、高能带电粒子探测器、可见光—近红外成像光谱仪、宽视场相机和用于无线电科学实验的超稳定振荡器(USO)。大气进入器将配置一套标准大气结构

仪器包(温度、压力和加速度传感器)、质谱仪、Ortho-Para 氢传感器和 USO。

以上载荷配置是为了在飞行任务工程能力约束下,以最低的资源需求满足最多的科学目标,若后续探测器质量存在余量,可能在轨道器上增加微波辐射计、紫外光谱仪、中红外光谱仪、能量中性粒子分析仪和多普勒成像仪,在大气进入器上增加浊度计、净通量辐射计、氦丰度探测器,以增强对具体科学目标的满足度。

(4)飞行轨道

天王星距离地球最远达 18.9 天文单位(AU),约 27.8 亿千米。为了缩短飞行时间并充分利用现有运载火箭的能力,UOP 任务采用了“行星引力辅助”技术,借力序列为地球—木星—天王星。

探测器由运载火箭直接送入日心轨道,发射 C3 为 $29.36\text{ km}^2/\text{s}^2$ 。巡航期间,探测器计划于 2032 年 6 月 27 日实施一次深空机动(DSM),实现约 659 m/s 的速度增量调整,以确保精准进入天王星轨道。

抵达天王星系统后,探测器将进行天王星轨道置入(UOI)操作,随后,释放大气进入器进入天王星大气层。在完成大气进入器的释放和数据传输后,轨道器将其轨道倾角调整至赤道平面,并在此过程中进行观测。之后,通过调整轨道参数,轨道器将多次飞掠天王星卫星,包括 Ariel、Umbriel、Titania 和 Oberon,以进行科学观测和数据采集。UOP 任务行星际轨道如图 2 所示。

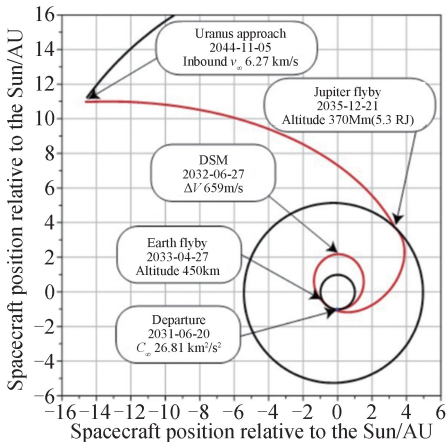


图 2 UOP 任务行星际轨道^[30]
Fig.2 UOP mission interplanetary trajectory

在完成 4.5 年的科学探测任务后,轨道器将进行最后一次轨道调整,进入天王星大气层,结束使命。

(5) 总体方案

UOP 探测器发射总质量 7 235 kg,干质量 2 756 kg,最小需求包络直径 5 m,高度 7.1 m。

轨道器电源系统配置了 3 台新一代放射性同位素电源(NGRTGs),每台电源质量约 56 kg,在任务初期可提供约 735 W 电能,任务末期仍可提供约 493 W 电能。热控设计方面,通过巧妙利用 RTG 的废热来加热推进贮箱,并借助热控多层、散热器、百叶窗和热管等手段,实现对整器热环境的精准管理。轨道器配备了一副直径为 3.1 m 高增益天线,工作频段涵盖 X 和 Ka 波段,具备每地球日下传约 19.5 kbit 数据的通信能力。

大气进入器的设计质量约为 267.5 kg。其热控设计采用了专门的热防护材料和结构,确保在进入大气层时能够有效抵御高温和高压环境。此外,利用放射性同位素热源(RHU)来维持进入器内的温度稳定。进入器外壳上配备了散热器热开关,该装置在巡航、进入和下降阶段全程参与热管理。

2.2 海王星奥德赛任务^[34-35]

(1) 任务概述

海王星奥德赛(Neptune Odyssey)任务是 NASA 提出的一项旗舰级太空探索概念任务,旨在探索海王星及其卫星系统,包括轨道器和大气进入器。该任务曾被考虑作为“2023—2032 年行星科学十年调查”的优先任务,但因成本等原因,最终 UOP 任务入选。任务计划于 2033 年由太空发射系统(SLS)或同类运载火箭发射,经历为期 16 年的地—海转移阶段,之后在海王星执行为期 4 年的科学探测任务。若使用木星借力,发射日期需要提前至 2031 年,但转移时间可缩短至 12 年。海王星奥德赛任务概念如图 3 所示。

(2) 任务目标

奥德赛任务聚焦五大科学问题:冰巨星的起源、海王星磁场、海卫一海洋世界、比较行星学以及小卫星和星环系统。任务将全面探测海王星

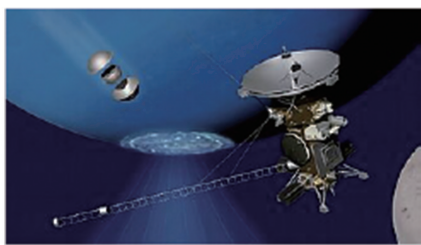


图 3 海王星奥德赛任务概念图^[25]
Fig. 3 Neptune Odyssey concept diagram

的磁环境,绘制其磁层详细构造,分析粒子分布、辐射带特征及极光驱动机制。同时,将深入研究海卫一的表面地质、内部结构、大气层及其与海王星磁层的相互作用。海卫一作为可能的柯伊伯带天体,其研究将为与冥王星等同类天体的比较行星学提供关键数据。此外,探测器还将对海王星的环以及卫星进行多次观测,探索环物质的来源及其系统运行机制。通过这些研究,将揭示海王星起源与动力学特征,为冰巨星和柯伊伯带天体的科学研究提供重要科学数据。

(3) 载荷配置

海王星奥德赛任务轨道器上拟搭载 14 台科学仪器,包括磁力计、彩色窄视场相机、紫外成像光谱仪、离子和中性粒子质谱仪、激光测高仪、可见光—近红外成像光谱仪、无线电和等离子体波探测器、热红外成像仪、微波辐射计、热等离子体光谱仪、高能带电粒子探测器、高能中性原子成像仪、尘埃探测器、EPO 摄像机。轨道器有效载荷配置如图 4 所示。

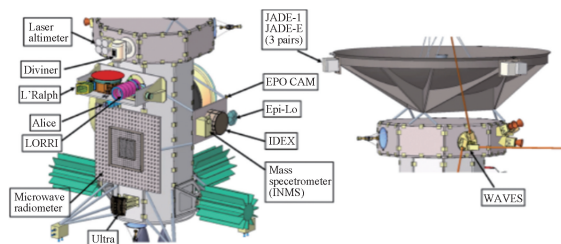


图 4 轨道器有效载荷配置示意^[34]
Fig. 4 Orbiter and instrument configuration

大气进入器拟配置 7 台有效载荷,包括质谱仪、大气结构仪、氦丰度检测器、Ortho-Para 氢传感器、浊度计、净通量辐射计、EPO 摄像机。大气进入器有效载荷配置如图 5 所示。

(4) 飞行轨道

运载火箭将探测器发射至一条绕地球的停泊轨道,短暂滑行后开始轨道转移。火箭二级和

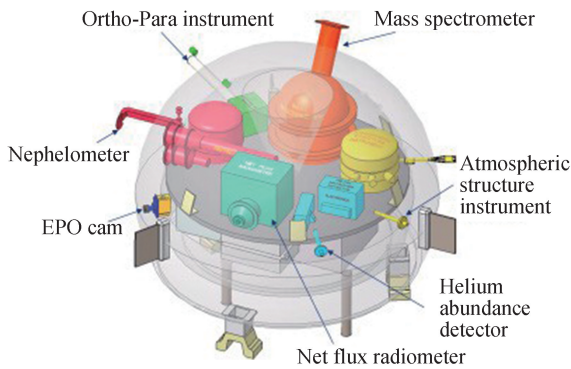


图 5 大气进入器有效载荷配置示意^[34]
Fig. 5 Probe and instrument configuration

上面级将为探测器提供总计 8.6 km/s 的速度增量,使其加速并进入一条偏心率为 0.97 的大椭圆日心轨道,以 148.3 km/s 的速度离开地球。

按照标称工况,2036 年 11 月,探测器执行一个速度增量为 245.282 m/s 的轨道平面机动(BPM),以降低海王星轨道置入点所需的速度增量。轨道机动完成后,探测器转入休眠状态,并在飞行过程中进行几次轨道中途修正。经过 15.9 年的轨道飞行后,在抵达海王星的前 30 天,探测器执行大气进入器分离(SEP)动作。奥德赛 20 年的旅程以及 2033—2053 年期间行星位置如图 6 所示。

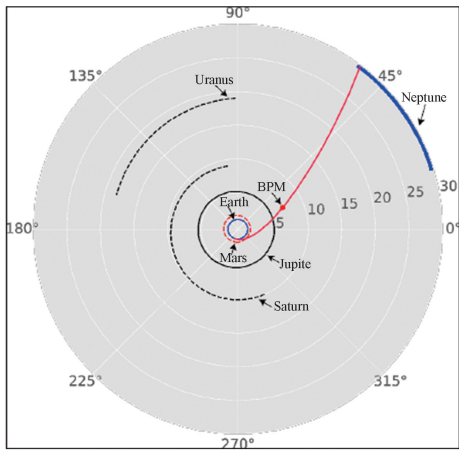


图 6 奥德赛 20 年的旅程以及 2033—2053 年期间行星位置^[34]
Fig. 6 Odyssey's 20-year journey and locations of the planets during 2033—2053

大气进入器分离 15 天后,探测器执行一次转向机动(DM),将轨道近海点提升至约 2 000 km。随后,在探测器到达最接近海王星的位置时,执行速度为 946 m/s 的轨道置入(NOI)机动,形成一个周期为 213.5 天的轨道。在该轨道

的远地点,探测器将执行一个 350 m/s 的近海点提升操作(PRM),确保于 2050 年 2 月成功与海卫一首次相遇,此时的人射速度(v_{∞})为 3.72 km/s。

然而,探测器不会直接进入环绕海卫一的轨道,而是借助海卫一飞掠来进入共振轨道,并通过一次小的变轨来调整下一次飞掠的近点。通过这种方式进行多次飞掠,产生的轨道可以实现海卫一的近全球覆盖,同时保持在海王星的环绕轨道上,以便同时研究海王星和海卫一。图 7 给出了奥德赛任务在海王星和海卫一探测阶段的轨道示意,海卫一轨道用黑色表示,坐标轴以海王星半径为单位。图中灰色轨迹为捕获轨道,为任务第一阶段;红色轨迹、绿色轨迹、蓝色轨迹、青色轨迹分别为第二至第五阶段轨道;品红色轨迹为第六阶段至任务结束的轨道。

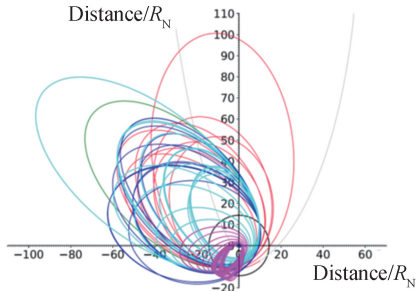


图 7 奥德赛对海王星和海卫一 4 年巡视轨迹示意^[34]
Fig. 7 Odyssey's 4-year tour of Neptune and Triton^[34]

(5)总体方案

奥德赛探测器发射质量约 3 218 kg,干质量约 1 594 kg,最小需求包络直径 4.56 m,高度 6.96 m。

轨道器的供电系统采用 3 台 NGRTG,在任务初期可提供 1 600 W 电功率。数传系统配置 1 副直径 4 m 的抛物面高增益天线(HGA)、3 个低增益天线(LGA)和 3 个中增益天线(MGA),工作频段涵盖 Ka 波段和 X 波段。其中 1 个 LGA 专门用于在海王星大气进入器进入过程中,通过超高频链路,接收大气进入器的数据。热控设计采用多种形式:对科学仪器、高增益天线、大气进入器、电子设备和推进模块实行隔热措施;电子设备舱使用加热器进行温度补偿;百叶窗在太阳距离增加、外部光照减弱和内部散热变化期间,对电子设备模块温度提供被动控制;热控多层覆盖探测器表面以隔离热环境变化;NGRTG 安装

在拥有大散热面的位置,通过叶片散热器排出余热。

大气进入器质量约为 273.2 kg。在巡航期间,进入器的飞行计算机和各个组件可使用轨道器提供的总线电源进行自检和软件更新;此外,还配有一个冗余的低功耗定时器电路,在分离时被触发,并在 30 天的最终接近过程中供电。其隔热系统的设计与 UOP 任务的进入器类似,采用多种隔热措施以抵御进入过程中可能超过 40 MW/m^2 的峰值热流密度和超过 6 MPa 的驻点压力。

2.3 冰巨星探测任务 ODINUS^[36-38]

(1)任务概述

ODINUS(Origins, Dynamics and Interiors of Neptunian and Uranian System)任务是欧空局(ESA)于 2013 年面向“宇宙愿景计划”提出的天王星和海王星联合探测任务,目前尚未被选为 ESA 的正式任务,若后续入选,预计将在 2034 年发射。任务拟采用两颗同型探测器(以北欧万神殿中的孪生神命名为 Freyr 和 Freyja),分别实现对海王星和天王星的环绕探测。采用双探测器的优势在于不仅有助于降低任务开发成本,还能利用相同的仪器设备对两个冰巨星系统进行测量和探索,从而实现对比研究。

(2)任务目标

ODINUS 任务的科学目标聚焦于 ESA “2015—2025 年宇宙愿景计划”的三大主题:揭示行星形成与生命出现的条件,探究太阳系的运作机制以及验证宇宙的基本物理定律。任务将深入研究天王星和海王星的大气组成及其相对于太阳的丰度富集情况,以揭示冰巨星的形成时间、地点及其是否经历了迁移。此外,任务还将探究这些行星的冰与岩石比例,以及“非本地”材料在其形成过程中的来源。通过对比两颗行星的卫星系统,揭示卫星的起源——是原始形成的,还是在行星自转轴倾斜后重新形成的,同时探究不规则卫星的起源。探测器将对天王星和海王星的卫星系统进行详细探测,以研究卫星的表面和内部演化过程。通过研究这些行星的磁场、等离子体环境及其与卫星的相互作用,揭示太阳系中行星与卫星之间的复杂关系,以及这些

关系如何影响行星系统的整体演化。

(3)载荷配置

ODINUS 探测器预计将携带宽视场相机和窄视场相机、可见光—近红外成像光谱仪、磁强计、离子和中性粒子质谱仪、多普勒光谱仪、微波辐射计以及无线电科学包。如果后续预算等允许,可携带高能中性原子探测器和高灵敏度加速度计,以提高探测的完整性和飞行任务的科学回报。

(4)飞行轨道

探测器将首先进入地球与天王星(或海王星)之间的霍曼转移轨道,并在距离相应行星约 $2 \times 10^7 \text{ km}$ 的高偏心轨道,通过化学推进完成轨道置入。选择置入轨道的目的是使探测器进入不规则卫星所在的高离心率轨道,以实现对不规则卫星的一次或多次飞掠;随后,探测器将通过执行机动或利用规则卫星的引力辅助,转移到规则卫星分布的区域,并维持偏心轨道,以便同时对规则卫星和行星或其环系统进行观测。在完成行星的主要任务后,探测器将执行一次机动,进入离心率较大的轨道,再通过第二次机动将轨道调整为低离心率、高海拔轨道,深入行星大气层内部,最终可能实施大气进入探测。

(5)总体方案

ODINUS 任务每个探测器的发射质量预计约为 3 000 kg,干质量约为 500~600 kg。探测器电源系统采用放射性同位素电源(RTG)。通信系统将配备高增益天线,以确保与地球的可靠通信,通信频段包括 X 波段和 Ka 波段,以支持科学数据的传输和遥控信号的接收。

2.4 小结

通过以上典型任务的调研分析,可以得出以下结论:

1)冰巨星探测已成为各国后续行星探测任务发展重点。冰巨星作为研究系外行星的蓝本,科学价值极高。近年来 NASA、ESA 相继考虑对冰巨星开展探测,美国已将天王星探测作为旗舰级任务推动工程实施。

2)冰巨星环绕探测工程技术挑战性大。冰巨星探测方式已由早先的“飞掠探测”向更精细、更多样的探测方式发展,以获取更为丰富、全面、

细致的全方位的科学数据。探测器最远 30 AU 可达性需求,对轨道设计、空间能源、极远距离通信等技术提出了更高的挑战,因此,国际上目前选择距离相对较近的天王星作为探测目标。

3)海王星的探测不仅能填补世界空白,而且作为距离太阳系最边缘的行星,一次探测任务可以实现多个探测目标,可近距离观测海卫一,可对柯伊伯带进行观测,具有更多科学主题和更高的科学价值。

3 冰巨星环绕探测关键难点分析

冰巨星环绕探测存在飞行距离远、任务周期长、探测目标多、任务环境未知的特点,将面临以下难点。

3.1 轨道设计

冰巨星系统距离地球遥远,交会探测对应的双曲超速大,导致传统制动所需的速度增量,纯机动的捕获方式难以形成近圆轨道并实现对高价值卫星的高精度探测。而冰巨星系统内存在诸多卫星,利用卫星的旁近飞行带来的探测器状态变化以及太阳、木星等大天体的引力摄动作用,有望部分代替主动推力,实现探测器轨道参数改变,大大节省燃料消耗,提高科学回报。冰巨星卫星数量众多,且相对相位关系时变,探测器在多天体系统内的运动与传统二体轨道差异大,存在明显的混沌特性,亟需深刻认知多天体系统内的运动规律,揭示运动敏感区域,将探测器推力与多天体引力相结合,实现能量放大效应,降低探测器多目标探测燃料消耗需求。利用多天体引力摄动的转移与捕获轨道设计,相比传统捕获方案预期降低速度增量 10%,并可实现冰巨星环绕及主要卫星的抵近探测,为未来的冰巨星环绕探测任务轨道设计奠定理论基础。

3.2 能源供给

木星及以远的深空科学探测任务中,因距离太遥远等而导致传统的太阳能无法利用,核能是唯一的选择。核能中衰变能和裂变能是目前工程上能够可控应用的能源方式,相比于基于裂变能的空间堆电源,基于衰变能的同位素电源具有

寿命长、可靠性高、易于小型化、环境适应性强等优势。同时,同位素电源的优势功率区间为 1000 W 以下,与深空探测任务的功率需求十分匹配,因此,同位素电源是冰巨星环绕探测任务的最优先选择。而中国自主可控的同位素电源产品仍属空白,需开展高稳定性、低衰减温差同位素电源技术攻关,实现设计寿命大于 20 年、年衰减小于 3% 的指标,解决小型化、高效率、低衰减等难题。

此外,同位素电源所产生的废热,能够为冰巨星探测所面临的深低温环境提供解决手段,开展自适应智能热管理技术研究具有现实意义。可采用整器热控传输通道与 RTG 耦合,同时实现整器保温、RTG 废热利用及 RTG 冷端降温多重需求。技术难点包括大开关比自适应调节散热面、超低温泵驱两相流体回路工质、新型极低等效发射率多层隔热组件、RTG 整器热耦合管理技术等。

3.3 测控通信

与火星探测任务相比,冰巨星探测面临的主要困难是最远 30 AU 所带来的巨大的空间衰减,与火星探测任务最远 4 亿千米距离相比,距离增加了 10 倍,自由空间损耗增大了约 20 dB。同样的器上发射功率和天线的设计状态下,探测数据的传输速率受到了极大的限制,通信码率均低于火星探测几个数量级以上。新视野号探测器短暂地飞掠冥王星及其卫星卡戎时,获取的科学数据耗时 15 个月才传回地球。之后对柯伊伯带小天体短暂飞掠的探测数据,回传地球耗时 20 个月。不到 1 kbit/s 的对地数据传输能力,极大地限制了科学探测效率。冰巨星探测将对探测目标开展精细的环绕探测,保证最远 30 AU 时高速器地数据传输是科学数据及时获取的基本条件。冰巨星极远距离高速数传技术主要研究内容包括:30 AU 通信技术体制论证、Ka/X 双频段应用技术、Ka 频段高灵敏度应答机技术、轻量化大口径多频率收发复用天线技术、高效高压比数据处理技术、测控高可靠性管理技术等,目标是实现器地相距 30 AU 以远的低电平和低码速率信号捕获、跟踪和解调,捕获灵敏度达到 157 dBm。

3.4 智能自主

在冰巨星探测动辄十几年的漫长任务周期中,星际自主导航与长期自主管理技术是解决突发事件和故障问题、保证探测器安全生存的重要方法。冰巨星探测任务空间尺度大,飞行时间长,深空环境未知因素多且更复杂,加之探测器与地面测控站的通信延迟大,信号还可能被太阳及其他天体遮挡,这使得基于地面测控站的导航与控制反应慢,不利于突发事件的处理。因此,冰巨星探测器需要发展自主导航与自主管理技术,实现在地面通信完全中断的情况下仍然能够完成轨道确定和控制、姿态定向及目标跟踪等任务,增强飞行器的自主生存能力。

自主导航与控制方面,需要通过高性能光学成像敏感器、X射线探测器等,获取行星及其卫星陆标图像、恒星光行差以及X射线脉冲到达时间等测量信息,达到导航定位精度优于50 km、测速精度优于10 m/s的性能水平。

自主管理方面,需要开展基于动态感知信息与态势预测的智能规划、探测器健康状态评估技术攻关,形成对任务环境的认知理解和决策能力。

3.5 大气进入探测

根据典型任务工况分析,冰巨星环绕探测任务大气进入过程中峰值热流密度可能超过 40 MW/m^2 ,驻点压力超过6 MPa,传统高密度碳/酚醛(HCP)、PICA、Avcoat等材料难以满足海王星大气进入器防热及轻量化需求。针对上述严酷条件,NASA正在研发适用于极端环境进入的隔热技术材料(HEEET),这是一种三维编织热防护材料技术,由碳纤维与酚醛混纺纱通过三维编织成型得到预制件,灌注酚醛树脂固化成型后经机械加工得到单体。目前已有试验数据表明,这种材料能承受热流密度约 36 MW/m^2 ,驻点压力约5 MPa。虽然该材料性能目前距离冰巨星大气进入探测需求还有一定差距,但未来通过优化设计和工艺,开展更全面的试验摸底,有望为冰巨星大气进入提供一种可行的、质量高效、易于制造的热防护系统。此外,大气进入器的防热结构还需考虑15年地—海转

移过程中深低温存储问题。

同时,在对冰巨星大气进入探测还面临大气结构不确定性强、缺乏高精度高空大气工程模型的难题,相关气动外形设计需要具备强适应性的特征,特别是针对海王星高达 $2\,100\text{ km/h}$ 的表面风暴开展任务分析,进行规避或者专门设计。

4 冰巨星环绕探测任务实施建议

在中国已有行星探测规划的基础上,应以“科学优先”为原则,围绕行星科学前沿重大问题,深化行星科学认知,揭示行星起源与演化规律、生命与宜居性奥秘,实现行星探测高水平发展。面向中长期发展,建议中国太阳系内行星探测2050年前的优先重大任务必须要面向“原创突破、世界领先”。

天王星、海王星及其各自的卫星构成的系统各具特点,当前科学研究认为天王星和海王星是探索太阳系与行星起源的关键要素,同时海王星也是探索地外生命和生命起源的突破口,其科学价值更高。另外,海王星作为目前已知最接近太阳系边缘的行星,一次探测任务可以实现多个探测目标,可近距离观测海卫一,可对半人马族小天体进行探测等,可以取得多项原创性科学成果,因此应将海王星作为中国行星探测优先重大任务的首选目标。考虑主要技术难点攻关预期和长达15年左右的任务周期,冰巨星环绕探测应在中国现有行星探测技术基础上尽早实施,建议选择2033年作为一个可选的发射窗口。

通过一次任务实施海王星的环绕与大气进入探测,将能够获得海王星磁层科学、大气结构及内部活动数据,可揭示外日球层空间天气对大气和水逃逸的影响,研究海卫一与太阳风—磁层物质能量输运的联系,探寻海卫一冰下海洋生命信号,与中国已实施或正在研制中的火星探测、小行星探测、木星系探测任务一起,完善中国太阳系行星探测任务图谱。海王星探测任务的实施,将在国际上首次完成海王星环绕、进入探测,实现海卫一多次飞掠、遥感探测,获得冰巨星科学探测成果,推动多天体借力轨道转移与小推力行星捕获、极远距离持续高速率数据传输、自主导航与智能管理等工程技术快速发展,使中国航

天器具备全太阳系可达能力,带动中国航天整体技术水平,实现世界领先。

5 结论

冰巨星探测任务科学意义重大,但任务周期长,难度大,技术风险高。本文对冰巨星探测的科学意义进行了详细阐述,介绍了国外典型的冰巨星探测任务,包括 UOP 任务、海王星奥德赛任务和 ODINUS 任务,分析了冰巨星探测的关键难点,结合中国现状,提出了冰巨星探测任务的建议。随着国际上对冰巨星探测任务的推进,中国应加快论证方案先进、有特色且可行的冰巨星探测任务,布局研究计划,开展海王星顶层任务设计和关键技术研究,加快推动工程任务部署与实施,为中国迈向更远深空、推进高水平科技自强自立奠定坚实基础。

参考文献(References)

[1] GUILLOT T, GAUTIER D. Giant planets[J]. Eprint Arxiv, 2009, 28(2): 439-464.

[2] ARRIDGE C S, AGNOR C B, ANDRE N, et al. Uranus pathfinder: exploring the origins and evolution of ice giant planets[J]. Experimental Astronomy, 2012, 33 (2-3): 753-791.

[3] SMITH B A, SODERBLOM A, BANFIELD D, et al. Voyager 2 at Neptune: imaging science results [J]. Science, 1989, 246(4936): 1422-1449.

[4] TYLER G L, SWEETNAM D N, ANDERSON J D, et al. Voyager 2 radio science observations of the Uranian system: atmosphere, rings, and satellites [J]. Science, 1986, 233(4759): 79-84.

[5] TYLER G L, SWEETNAM D N, ANDERSON J D, et al. Voyager radio science observations of Neptune and Triton[J]. Science, 1989, 246(4936): 1466-1473.

[6] 杨孟飞,郑燕红,倪彦硕,等. 太阳系内行星探测活动进展与展望[J]. 中国空间科学技术, 2023, 43(5): 1-12.

YANG M F, ZHENG Y H, NI Y S, et al. Progress and prospect in planetary exploration of solar system [J]. Chinese Space Science and Technology, 2023, 43(5): 1-12 (in Chinese).

[7] FLETCHER L N, HELLED R, ROUSSOS E, et al. Ice giant system exploration within ESA's Voyage 2050[J]. Experimental Astronomy, 2022, 54(2-3): 1015-1025.

[8] HELLED R, BODENHEIMER P. The formation of Uranus and Neptune: challenges and implications for

intermediate-mass exoplanets [J]. The Astrophysical Journal, 2014, 789(1): 69-79.

[9] HELLED R, GUILLOT T. Handbook of exoplanets [M]. Switzerland: Springer Cham, 2018: 1-19.

[10] SLATTERY W L, BENZ W, CAMERON A G W. Giant impacts on a primitive Uranus, Icarus [J]. Icarus, 1992, 99(1): 167-174.

[11] KEGERREIS J A, EKE V R, GONNET P, et al. Planetary giant impacts: convergence of high-resolution simulations using efficient spherical initial conditions and swift [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 487(4): 5029-5040.

[12] NESS N F, ACUÑA M H, BEHANNON K W, et al. Magnetic fields at Uranus [J]. Science, 1986, 233(4759): 85-89.

[13] NESS N F, ACUÑA M H, BURLAGA L F, et al. Magnetic fields at Neptune [J]. Science, 1989, 246(4936): 1473-1478.

[14] SCHUBERT G, SODERLUND K M. Planetary magnetic fields: observations and models [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2011, 187(3-4): 92-108.

[15] GRITON L, PANTELLINI F, MELIANI Z. Three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of the solar wind interaction with a hyperfast-rotating Uranus [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2018, 123(7): 5394-5406.

[16] MASTERS A. Magnetic reconnection at Uranus' magnetopause [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, 119(7): 5520-5538.

[17] HOOGEVEEN G W, CLOUTIER P A. The Triton-Neptune plasma interaction [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1996, 101(A1): 19-29.

[18] SODERBLOM L A, KIEFFER S W, BECKER T L, et al. Triton's geyser-like plumes: discovery and basic characterization [J]. Science, 1990, 250(4979): 410-415.

[19] Wikipedia. New horizons 2 [EB/OL]. (2023-01-09) [2025-03-01]. https://en.wikipedia.org/wiki/New_Horizons_2.

[20] Wikipedia. Argo [EB/OL]. (2023-01-09) [2025-03-01]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Argo>.

[21] Wikipedia. ODINUS [EB/OL]. (2023-01-09) [2025-03-01]. <https://en.wikipedia.org/wiki/ODINUS>.

[22] OLESON S R, LANDIS G. Triton hopper: exploring Neptune's captured Kuiper belt object [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2018: 367-428.

[23] JARMAK S, LEONARD E, AKINS A, et al. QUEST: a new frontiers Uranus orbiter mission concept study [J]. Acta Astronautica, 2020, 170: 6-26.

[24] Wikipedia. Trident [EB/OL]. (2025-01-25) [2025-03-01]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Trident>.

[25]

Wikipedia. Neptune Odyssey [EB/OL]. (2025-01-25) [2025-03-01]. https://en.wikipedia.org/wiki/Neptune_Ody-ssey.

[26]

HANSEN K C, FIELHAUER K B, MARTIN E, et al. Triton ocean world surveyor; a Neptune orbiter & Triton explorer, white paper submitted to the Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey 2023-2032 [R]. Washington: NASA Planetary Science Division, 2021.

[27]

Wikipedia. Uranus orbiter & probe [EB/OL]. (2023-01-09) [2025- 03-01]. https://en.wikipedia.org/wiki/Uranus_Orbiter_&_Probe.

[28]

STECKEL A V, CONRAD J W, DEKARSKE J, et al. The science case for Nautilus; a multi-flyby mission concept to Trinton[C]. 55th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: LPI Contributions, 2024; 1173-1174.

[29]

MANDT K E. The first dedicated ice giants mission[J]. Science, 2023, 379(6633): 640-642.

[30]

SIMON A, NIMMO F, ANDERSON R C, et al. Uranus orbiter & probe; planetary mission concept study for the 2023-2032 decadal survey, white paper submitted to the Planetary Science and Astrobiology Decadal Survey 2023-2032[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2021.

[31]

DONAHUE B, DUGGAN M. The NASA space launch system; six future missions[C]. 2023 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2023; 1-10.

[32]

DUTTA S, SHELLABARGER E, SCOGGINS J B, et al. Uranus flagship-class orbiter and probe using aerocapture[C]. AIAA SciTech 2024 Forum. Florida: AIAA, 2024; 714-728.

[33]

GIRIJA A P. A flagship-class Uranus orbiter and probe mission concept using aerocapture [J]. Acta Astronautica, 2023, 202; 104-118.

[34]

ABIGAIL R, BRENDA C, KIRBY R. Neptune odyssey: mission to the Neptune-triton system; 20210021723[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 2020.

[35]

ABIGAIL R R, BRENDA C. Neptune odyssey; a flagship concept for the exploration of the Neptune-triton system [J]. The Planetary Science Journal, 2021, 2(5): 184-198.

[36]

TURRINI D, POLITI R, PERON R, et al. The ODINUS mission concept; a mission to the ice giant planets to the history of the solar system [C]. European Planetary Science Congress. London: EPSC, 2013; 914-915.

[37]

TURRINI D, POLITI R, PERON R, et al. The ODINUS mission concept; the scientific case for a mission to the ice giant planets with twin spacecraft to unveil the history of our solar system; arXiv: 1402. 2472v2 [R]. Paris: European Space Agency, 2014.

[38]

TURRINI D, POLITI R, PERON R, et al. The comparative exploration of the ice giant planets with twin spacecraft; unveiling the history of our solar system[J]. Planetary and Space Science, 2014, 104; 93-107.

作者简介:

杨孟飞(1962—),男,研究员,博士生导师,研究方向为空间飞行器系统总体、控制系统和高可靠控制计算机等, yangmf@bice.org.cn。

高峰(1978—),男,研究员,研究方向为结构力学、飞行器总体设计等, 13810732516@163.com。

(编辑:程松涛)