



冰巨星环绕探测任务设想

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

1. 中国空间技术研究院, 北京 100094

2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* 联系人, E-mail: yangmf@bice.org.cn

冰巨星作为最接近太阳系边缘的行星, 保留了大量太阳系形成初期的气体, 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^[1,2]。冰巨星环绕探测将对目标天体的形貌、行星环、大气结构和组成、大气流动、磁层、电离层、地下海洋等要素开展研究, 填补空间物理、空间天文和行星科学等方面的诸多空白, 而且有助于解决太阳系形成与演化、宇宙起源和生命起源等重大基础科学问题^[3,4]。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2100 km/h^[5,6]。海卫一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^[7]。

自20世纪60年代以来, 美国、苏联/俄罗斯、欧洲各国、日本、印度、中国、阿联酋等先后开展了行星探测任务, 并制定了行星探测路线^[8-10]。天王星和海王星是距离太阳较远的两颗冰巨星, 目前只有旅行者2号进行了飞掠, 探测了冰巨星的磁场与辐射场、表面形貌和大气组成^[5,11]。目前尚未实施过冰巨星及其卫星的环绕探测, 对冰巨星的大气层、内部结构及其卫星认识均较为局限。面向未来, 天王星、海王星将成为行星探测拓展的重要阵地^[12], NASA的天王星轨道器和进入器(Uranus Orbiter & Probe, UOP)是最高优先级旗舰任务, 将开展多年环绕探测与大气进入原位探测^[13]; NASA的海王星奥德赛任务(Neptune Odyssey)将历经16年巡航进入海王星系统开展为期4年的轨道任务^[14]; ESA的ODINUS任务将对天王星和海王星开展联合探测, 研究冰巨星系统的形成和演化^[15], 冰巨星探测已成为各国行星探测重点。

1 冰巨星探测目标特性分析

太阳系八大行星根据组成特征可分为类地行星和类木行星。类地行星(水星、金星、地球和火星)主要由岩石和金



杨孟飞 博士生导师, 中国空间技术研究院研究员, 中国科学院院士, 国际宇航科学院院士。主要从事空间飞行器系统、控制系统和高可靠控制计算机等专业研究和开发。

属构成, 特征为高密度、自转缓慢、无行星环、天然卫星稀少且拥有固态表面, 邻近太阳故称内行星。类木行星(木星、土星、天王星和海王星)体积庞大, 主要由氢和氦组成, 表现为低密度、快速自转、厚重大气层、拥有行星环与多卫星。类木行星按照内部结构和组成, 可细分为气态巨行星和冰巨星。气态巨行星的90%质量为氢和氦^[16], 而冰巨星内部主要由大量原始行星盘中低折射率的物质冷凝而成。

天王星离太阳约19.2 AU(1 AU等于地球到太阳的平均距离, 约为 1.5×10^8 km), 海王星则位于30.1 AU。由于太阳辐射强度随日心距的平方迅速衰减, 因此这些遥远行星接收到的太阳辐射显著减弱: 冰巨星所受太阳辐射量仅为地球的几百分之一, 导致其表面平均温度较低(约-200℃)。此外, 由于其远离太阳, 冰巨星的公转周期明显长于其他行星, 自转速度介于地球和气态巨行星之间。天王星和海王星的磁轴与其自转轴之间的夹角分别为59°和47°, 天王星的自转轴几乎与黄道面平行, 这使得其磁层结构和动力学过程呈现出显著的变化特征^[17], 如表1所示。

天王星和海王星的环系统结构复杂且动态变化。与土星显著不同, 冰巨星的环特征包括狭窄密集环带以及更暗淡

引用格式: 杨孟飞, 王赤, 高峰, 等. 冰巨星环绕探测任务设想. 科学通报, 2026, 71: 2236-2244

Yang M, Wang C, Gao F, et al. Conceptual design of an ice giant orbital exploration mission (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2236-2244, doi: 10.1360/CSB-2025-0661

表1 天王星和海王星基本参数对比

Table 1 Comparison of the basic parameters of Uranus and Neptune

参数	天王星	海王星
类别	冰巨星(主要由氢和氦构成, 内部富含冰物质)	
日心距离(AU)	19.2	30.1
天然卫星数	27	14
是否有全球磁场	有	有
公转周期(年)	83.8	163.8
自转周期(小时)	17	16
自转轴倾角(相对黄道面)	97.9°	29.6°
磁轴倾角(相对自转轴)	-59°	-47°
是否存在内等离子体源	否	是(海卫一)
是否存在地下海洋世界	否	可能(海卫一)
是否存在捕获的柯伊伯带天体	否	是(海卫一)

的尘埃成分, 这些差异表明其形成机制独特^[18]。土星的宽广环可能由潮汐力导致卫星解体产生的物质或穿越土星环被捕获的物质所组成。相比之下, 冰巨星的环质量较小、反照率低, 表明其可能主要由冰和低反照率的暗色物质(如硅酸盐和有机物)组成。冰巨星的环展示出快速变化的特征, 环与卫星之间的相互作用(如黏滞输运、自引力以及流星体和彗星撞击等过程)对行星环的演化至关重要, 可能是导致短期内环迅速变化的原因^[19-21]。

天王星和海王星分别拥有27颗和14颗已知的天然卫星, 这些卫星系统为研究冰巨星的地质活动和潜在宜居性提供了重要信息。天王星的五大卫星展示了复杂的地质特征, 但受限于观测数据, 对其表面特征的理解仍然有限。对冰巨星卫星系统的内部结构进行研究, 尤其是探测其重力场和磁场信息, 对于识别是否存在地下海洋至关重要^[22]。

和气态巨行星显著不同, 冰巨星的大气动力学过程主要由内部能量和太阳辐射共同驱动, 展现出独特的动力学和化学特征^[23,24]。冰巨星大气呈现出复杂的动态变化, 然而由于观测有限, 具体变化特征及其驱动机制尚不清楚。由于太阳辐射相对微弱, 平流层和热层的高温特性仍是未解难题。研究表明, 来自磁层的粒子沉降可能在冰巨星大气加热过程中扮演着重要角色^[24]。冰巨星大气富含甲烷和硫化氢等挥发性物质, 这些物质对大气的能量循环和动力学过程具有显著影响。

冰巨星拥有独特且复杂的内禀磁场, 其磁场显著偏离行星中心、严重倾斜且高速旋转, 包含显著的非偶极成分^[25,26]。这种奇异的磁场结构导致其磁层高度动态且不规则, 形成了太阳系中独特的非对称、剧烈变化的行星磁层。由于距离太阳遥远, 冰巨星受到的太阳辐射更弱、太阳风更稀薄, 这使得太阳风和磁层间的相互作用及行星电离层的形成明显不同于其他行星, 突显了其磁层的独特性^[27]。天王星和海王星

因具有不同的倾斜角度和太阳风条件, 再加上海卫一等离子体源的存在, 二者磁层也表现出明显差异^[17]。天王星磁层内部广泛分布着质子和电子等带电粒子, 这些粒子主要来源于氢冕、电离层和太阳风。相较之下, 海王星磁层物质主要为源自海卫一的重离子, 海卫一对海王星的磁层动力学具有显著作用^[28]。

海卫一是海王星最大的卫星, 展现了柯伊伯带天体、海洋世界和地质活跃天体的独特特征^[23]。海卫一拥有稀薄的氮气大气, 尽管大气压力极低, 但在地表物质运动中扮演重要角色。地表及地下羽流喷发物可能混杂在大气中, 增加了其复杂性, 同时也为飞掠探测海卫一羽流提供了机会^[29]。目前, 关于海卫一大气如何被电离形成浓密电离层、大气与地表活动间的相互作用等问题仍知之甚少。特别是, 海卫一特有的间歇性羽流及其遗迹, 被认为是搜寻生命相关化学元素的重点区域。旅行者2号曾在海卫一观测到了可喷发高达9公里的喷流现象, 但其动力学特性、来源、演化等信息尚不明确^[29]。海卫一具有太阳系独特的电离层, 主要由分子氮大气经磁层能量粒子沉降电离形成, 太阳辐射对其贡献相对较小。由于轨道倾角较大, 海卫一可能经历极端的季节变化^[22]。目前对海卫一大气和电离层的物质组成、动态变化和化学过程仍不清楚, 其电离层产生机制仍需进一步的观测验证。鉴于海卫一处于海王星时变磁层空间环境中, 其电离层表现出复杂的特性。例如, 海卫一电离层与潜在地下海洋之间的电流体系可能影响该卫星附近的磁场环境。通过环绕或飞掠探测获取电离层等离子体数据及感应磁场的三维数据, 并结合数值模型和轨道数据, 可以提供海卫一是否拥有地下海洋的关键证据。这种综合研究方法不仅有助于深入理解海卫一, 还可能为探索其他类似天体提供重要参考。天王星和海王星基本参数对比详见表1。

截至目前, 对冰巨星的实地测量数据仍局限于20世纪80年代旅行者2号的飞掠探测。由于受到当时卫星轨道和载荷性能的限制, 这些早期的探测虽然带来了许多新发现, 但也留下了一系列尚未解决的重大科学问题。因此, 开展专门且综合性的冰巨星环绕探测任务显得尤为必要, 并蕴含着巨大的科学探索价值。海王星和天王星都是十分特别的探索目标, 针对这两颗行星的深空探测任务均有可能带来重要的科学突破。特别是二者之间对比研究, 将有助于深入理解冰巨星以及系外类似天体的形成和演化。海卫一因其可能存在的“冰下液态海洋”, 成为探索地外生命的最佳目标之一。此外, 考虑到其可能是捕获的柯伊伯带天体, 对其进行深入研究还将有助于增进我们对柯伊伯带天体的理解。综上所述, 海王星探测任务应作为我国未来冰巨星探测计划中的首选。

2 冰巨星探测任务进展

目前, 八大行星中只有冰巨星无专属探测任务, 尚未实现环绕探测。1986年1月, 旅行者2号探测器飞掠天王星, 最近

距离约为81500 km, 发现了新卫星、行星环、天王星对自身磁场的扰动, 确定了天王星的自转周期^[11,30,31]; 1989年, 旅行者2号探测器飞掠海王星, 最近距离约为4500 km, 发现了新卫星、行星环、表面的大暗斑, 确定了自转周期及部分卫星的物理特性^[5,32,33]。旅行者2号对于天王星和海王星的探测过程仅持续数小时, 以光学相机、磁场、辐射场探测为主, 相对于两颗行星16~17小时的自转周期, 所获取的数据有限, 目前仍缺少全局的科学数据。

近年来, 国际上围绕冰巨星探测陆续提出了探测任务设想(详见表2)。美国2022年4月19日发布《行星科学十年计划白皮书》(2023~2032), 建议NASA将天王星及其卫星探测列为“最高优先级的新旗舰任务”。天王星轨道器和进入器任务(UOP)最初提案计划于2031年使用猎鹰重型运载火箭发射, 后在木星进行借力, 于2044年抵达天王星。但是在2023年, NASA宣布由于钚产量不足, 任务有可能在21世纪30年代中后期发射^[34]。

海王星奥德赛(Neptune Odyssey)任务是NASA提出的旗舰级太空探索概念任务, 目前尚未开展工程实施。奥德赛任务包含一个轨道器和一个大气层进入器, 旨在深入研究海王星、其星环、小型卫星、空间环境以及最大的卫星海卫一。任务提案计划于2033年由太空发射系统(SLS)或同类运载火箭发射, 进行为期16年的巡航, 前往海王星执行为期4年的主要轨道任务。但提案中也考虑若使用木星借力, 发射日期可提前至2031年, 巡航时间也可缩短至12年^[35,36]。

欧空局2021年6月发布的空间科学中长期发展规划“远航2050”, 将冰巨星探测作为“ESA参与并且做贡献的M级任务”。ODINUS (Origins, Dynamics and Interiors of Neptunian and Uranian System)任务是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, 目前尚未开展工程实施, 预计在2034年发射。任务拟采用两颗同型探测器(根据北欧万神殿中的孪生神命名为Freyr和Freyja), 分别实现海王星和天王星环绕探测, 研究冰巨星的系统起源、动力学和内部结构特征。使用双探测器的优势在于不仅可以降低飞行任务的开

发成本, 还可以在天王星和海王星系统中使用同一套仪器进行测量和探索, 从而实现对比研究^[37]。

3 冰巨星环绕探测任务载荷配置

3.1 冰巨星环绕探测科学目标

尽管旅行者2号、地基和空间望远镜的观测已显著提升了我们对冰巨星系统的认知, 但众多科学谜团仍未解开。综合考虑冰巨星的目标特性和探测工程实施难度(如任务轨道设计和载荷能力), 确定冰巨星环绕探测的三大科学目标: 冰巨星系统大气和地质活动、冰巨星系统空间环境和海卫一冰下海洋探测。

(1) 开展冰巨星系统大气和地质活动研究。天王星和海王星的大气研究揭示了两颗冰巨星具有相似的氘/氢(D/H)比值, 表明它们可能源自相同的冰质小行星源^[38]。通过分析碳、氮、硫和氧的丰度及相对太阳的富集程度, 可进一步了解原行星盘外部区域的条件, 为冰巨星形成演化的相关研究提供关键约束。冰巨星大气动力学由内部能量和太阳辐射共同驱动, 高时空分辨率观测有助于评估二者相对贡献, 这对理解冰巨星大气环流及其深层结构的耦合机制至关重要, 并对构建准确的动力学模型具有重要意义。此外, 海王星复杂的卫星系统, 特别是海卫一稀薄氮气大气及其间歇性羽状喷流现象, 展示了其地质活动的复杂性和潜在的生命信号^[29]。通过高分辨率光谱和成像数据, 可以揭示其地表特征、构造和地质活动, 探索潜在地下海洋和羽流。

(2) 开展冰巨星系统空间环境研究。冰巨星磁层是太阳系中独特的等离子体物理实验室, 展示了高度非对称且不规则的内禀磁场、严重倾斜的自转轴和磁轴、高速旋转等特性。磁层结构复杂且动态变化剧烈^[17,39], 磁层与太阳风之间的相互作用呈现出周期性的开闭现象。由于距离太阳较远, 冰巨星受到的太阳辐射较弱, 太阳风也更为稀薄, 这使得太阳风与磁层的相互作用更加独特^[27]。卫星也可能在系统空间环境中扮演着重要角色。例如, 海卫一具有稀薄的大气和电

表 2 冰巨星环绕探测任务对比

Table 2 Comparison of ice giant orbiter missions

探测器名称	科学任务描述	发射时间	总体参数
天王星轨道器和进入器(UOP)任务	天王星的起源、演变过程和宜居性	2035年后	探测器发射质量约7235 kg, 结构以欧罗巴快船探测器为基础。探测器将直接部署至日心轨道, 发射C3为29.36 km ² /s ² 。采用“行星引力辅助”技术, 借力序列为地球-木星-天王星
海王星奥德赛任务	海王星的起源、磁场、海卫一-海洋世界以及小卫星和星环系统	2033年	探测器发射质量约3218 kg, 高度6.96 m。轨道器供电系统使用3台NGRTG, 在装填28.8 kg钚-239燃料块时可提供1600 W电功率
冰巨星ODINUS任务	揭示行星形成和生命出现的条件, 探究太阳系的运行机制, 验证宇宙基本物理定律	2034年	每个探测器的发射质量约为3000 kg。电源系统由放射性同位素热电机(RTG)组成。探测器首先到达霍曼转移轨道, 在距离相关行星约2×10 ⁷ km的高偏心轨道, 通过化学推进完成轨道插入

离层,但目前对其物质组成、动态变化和化学过程等仍需进一步研究验证.海卫一与海王星的磁层环境之间可能存在复杂的相互作用.例如,海卫一电离层与潜在地下海洋间的电流体系可能会对其附近的磁场和粒子环境产生影响.通过近距离就位探测和数值模型,可以揭示海卫一地下海洋的存在性.太阳风与冰巨星磁层的相互作用、磁层等离子体源及输运机制、海王星极光产生机制等,都是冰巨星系统空间环境研究的重要科学问题.

(3) 开展海卫一冰下海洋探测.海卫一作为海王星系统中最大的卫星,因其潜在的冰下液态海洋而成为探索地外生命的热点目标之一.海卫一可能是被捕获的原柯伊伯带天体,深入研究其特性将有助于理解该类天体的特征^[22].海卫一表面的高反照率、低陨石坑密度和活跃的间歇冰火山活动表明其可能存在冰下液态水海洋^[23],海洋的具体属性(如深度、盐度、冰层厚度)及其是否含有生命信号仍需进一步验证,分析海卫一冰泉口喷射物的化学成分和含量对于确认生命迹象至关重要.目前,关于冰巨星系统内关键生命元素和物质的种类、浓度和赋存形式的研究尚属空白,探讨这些物质的时空分布规律是解开生命起源奥秘的关键.同时,探究驱动海王星与海卫一上元素循环的能量形式(如太空辐射能、内部热能、潮汐能等),对揭示物理化学环境下的生命形成机制具有重要意义.

3.2 有效载荷配置

根据科学目标,有效载荷配置建议方案与科学目标的对应关系如图1所示.

建议的初步载荷配置方案中,冰巨星环绕探测器拟搭载5类探测包,共12台载荷:(1)物理场探测包:矢量磁力仪(Vec-

tor Magnetometer)、波和射电分析仪(Wave and Radio Analyzer)、重力探测仪(Gravity Science);(2)粒子探测包:中性成分原位分析仪(Neutral Analyzer)、带电粒子与中性原子分析仪(Charged Particle and Neutral Atom Analyzer)、尘埃分析仪(Dust Analyzer);(3)成像探测包:可见光相机(Visible Camera);(4)气体成分探测包:红外光谱仪(Infrared Spectrometer)、紫外光谱仪(Ultraviolet Spectrometer)、太赫兹谱仪(Terahertz Spectrometer)、微波辐射计(Microwave Radiometer).此外,为实现载荷的集成化以及运行控制,还需配置载荷管理器(集成载荷电子学).

4 冰巨星环绕探测任务设想

4.1 任务概述

本文开展的冰巨星环绕探测任务设想将海王星作为优选目标.海王星是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,包括近距离观测海卫一、探测半人马小天体等.因此,按照设想,将通过一次任务,实现海王星环绕、大气进入以及海卫一的抵近探测,突破低能量捕获与环绕轨道、极远距离飞行器智能自主、高效能源与推进、测控通信等关键技术.利用2台发电功率300 W的RTG,初期功耗600 W,具备30 AU距离可达并长期生存的能力.按照暂定的2033年发射窗口,预计全任务周期不小于15年.

冰巨星环绕探测器的初步构型如图2所示.

冰巨星环绕探测任务主要指标包括:(1)发射日期:2033年前后;(2)任务目标:海王星环绕+大气进入,海卫一抵近探测;(3)发射重量:不大于3100 kg;(4)供电能力:2台发电功率

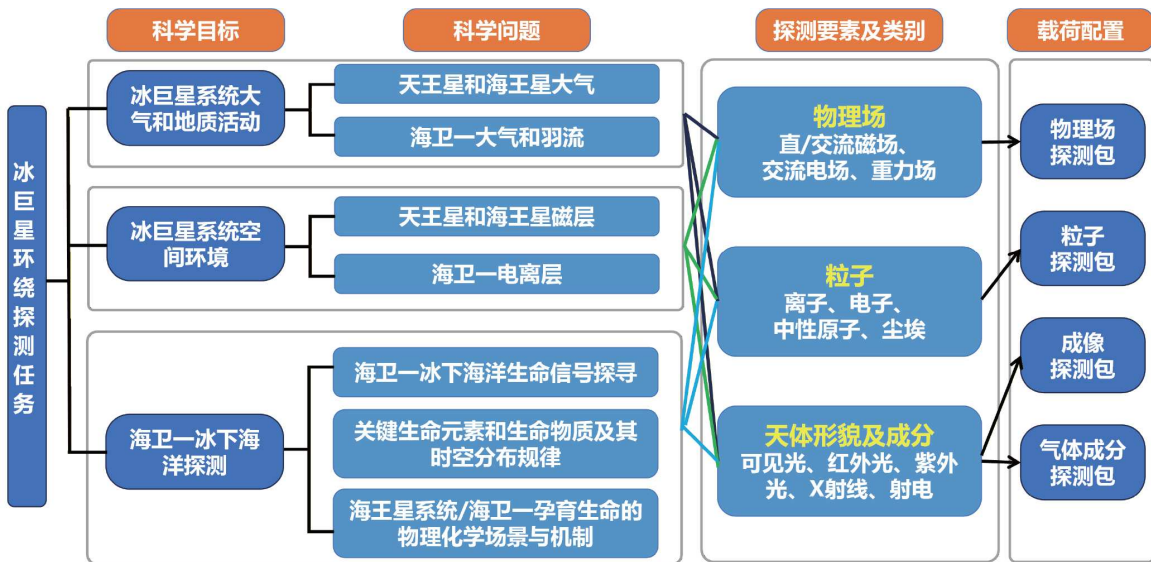


图1 (网络版彩色)科学问题-探测要素-载荷配置关联图

Figure 1 (Color online) Correlation chart of science question-exploration element-payload configuration

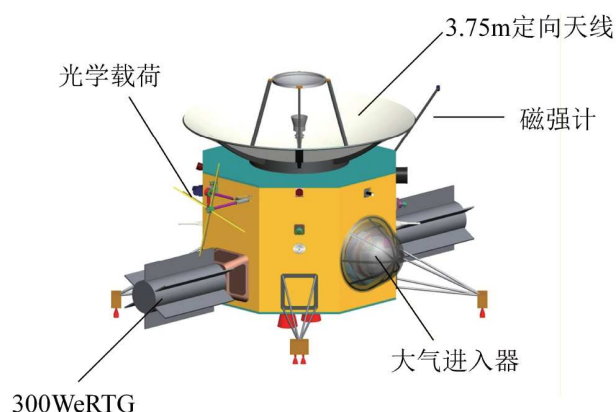


图2 (网络版彩色)冰巨星环绕探测器构型图

Figure 2 (Color online) Configuration diagram of the ice giant orbiting probe

300 W的RTG, 初期功耗600 W; (5) 数传能力: Ka数传下行 ≥ 32 kbps@30 AU; (6) 载荷承载能力: 270 kg(包括150 kg大气进入器); (7) 寿命: 适应任务周期不小于15年的探测任务。

4.2 任务过程

冰巨星环绕探测器任务过程如图3所示。采用重型运载火箭发射后, 探测器直接进入地-海转移轨道, 经过约15年的飞行到达海王星, 完成海王星交会捕获, 进入周期252天的椭圆轨道, 近海点释放大气进入器, 开展海王星大气剖面探测, 通过多次共振借力降低远心点高度, 最终进入使命轨道, 在25万公里轨道高度开展海王星全球遥感观测, 在变轨过程中开展海王星磁场立体探测。探测器到达海王星后将开展为期一年的环绕探测, 期间释放大气进入器, 开展海王星大气剖面探测, 择机开展海卫一飞掠和遥感探测。

4.3 飞行轨道设计

对于30 AU以远的深空探测任务, 转移轨道设计上可选用直接转移轨道和行星借力轨道。直接转移轨道对运载发射能力要求较高, 发射窗口选择灵活。“新视野号”冥王星探测器采用的是直接转移轨道。行星借力轨道能节省推进剂, 提高探测器荷质比。旅行者2号采用了“木星-土星-天王星-海王星”的借力飞行策略, “伽利略号”探测器、JUICE探测器均采用了“金星-地球-地球”的借力飞行策略。

对于木星以外的天体探测任务, 由于木星是引力常数最大的行星, 首选木星借力能实现最大的借力效果。对于地-木转移段, 可采用直接地-木转移或采用金星或地球借力的方式到达木星, 考虑到探测器热防护问题, 选择地球借力是最好的选择。若采用行星借力形式, 根据我国当前运载火箭发射能力, 可选择“地球出发-木星借力-海王星到达”或“地球出发-地球借力-木星借力-海王星到达”两种方案。根据地球、木星、海王星的相位关系, 一年半左右有一次地球到木星的发

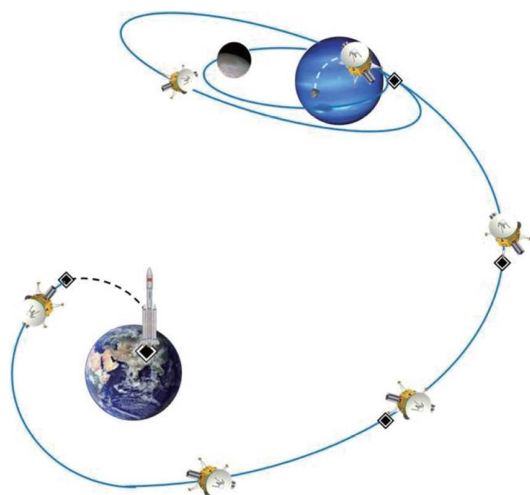


图3 (网络版彩色)任务过程示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of the mission process

射机会, 地球到木星的转移时间在600~700天, 而木星到海王星的转移时间则需要4000~6000天, 转移时间越长, 越容易被海王星捕获。

海王星及其卫星环绕探测任务若采用行星借力转移轨道, 则需要匹配2031年或者2043年两个木星借力窗口, 分别存在探测器研制时间紧张和到达海王星较晚的问题。因此, 考虑选用重型运载, 可直接发射至地-海转移轨道, 每年一次发射机会, 若运载能够实现地球出发C3不低于 $158 \text{ km}^2/\text{s}^2$, 则可以实现15年内到达, 拟选择窗口为2033~2034年。

到达海王星后, 利用海卫一借力降低捕获速度增量, 进入海王星约 70° 大倾角椭圆轨道, 开展海王星磁场立体探测, 如图4所示。

随后, 通过多次共振借力降低远心点高度, 对海王星和海卫一进行全球观测, 最终进入海卫一2:1共振轨道, 开展海王星和海卫一长期遥感观测, 各阶段轨道参数见表3所示。

4.4 空间核电源设计

能源是维持探测器正常工作的基本条件之一, 常规的航天器多利用太阳能满足探测器的能量需求。太阳辐射能量密度与距离平方成反比, 近地轨道的太阳光通量约为 1358 W/m^2 , 火星轨道的探测光通量约为 489 W/m^2 , 木星轨道光通量则降低到 50 W/m^2 , 20~30 AU处的太阳光通量仅为地球轨道的 $2.5 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3}$, 而1000 W的电能输出需要超大太阳帆板。显然对于超远距离的深空探测任务, 太阳能已经不能继续作为主要能源, 探测器需要选择更适合的能源系统, 且必须满足运行稳定、适应长期深空环境、可靠性高的需求, 核电源几乎是唯一的选择。空间用的核电源主要包括放射性同位素温差电源和空间核反应堆电源两类。

同位素温差电源是利用热电材料的塞贝克效应直接将

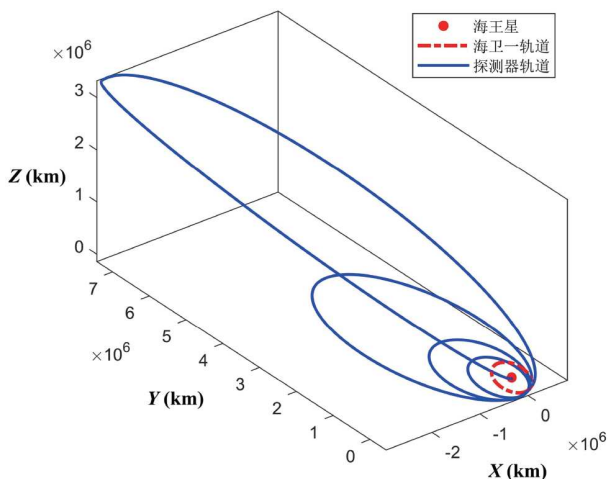


图4 (网络版彩色)使命轨道示意图

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of the mission orbit

热能转化为电能, 由于工作原理简单、内部没有运动部件, 因此具有可靠性高、无污染的优点。美国在“先驱者”“旅行者”“新视野”及几颗火星探测器上均使用了放射性同位素温差电源系统作为探测器的主能源; 我国在探月二期工程中也使用了小型同位素温差电源, 成功解决了探测器月夜工作能源需求的问题。综合冰巨星探测任务需求, 考虑到使用寿命、功率密度和防护措施, ^{238}Pu 是制造核热源体的首选同位素, 具有较长的使用寿命(半衰期87.4年), 20年后依然能够产生初始状态下约80%的能量。目前我国已具有较好的工程基础, 可以作为冰巨星环绕探测能源供给的首选技术途径。

空间核反应堆电源一般特指空间裂变核反应堆电源, 具有功率大、寿命长、生存能力强等优点, 是冰巨星探测器较合理的配置方案, 但在实际在轨应用中仍然存在寿命、自主管控等技术挑战, 因而在本任务中暂时不予考虑。

4.5 远距离测控数传设计

冰巨星环绕探测任务与地球通信最远距离超过45亿公里, 信号电平衰减大, 传输时延长, 对测控通信的传输性能和技术水平提出了更高要求。为适应超远深空探测测控数传的需求, 国际采用的方法主要包括增加地球站和探测器天线口径、增加探测器射频功率、采用先进的编译码技术、信源压缩技术、提高载波频率、降低接收系统噪声温度以及采用X/Ka双频通信等。美国NASA还提出了采用高频/激光混合

的通信技术以解决空间大容量传输的瓶颈, 这些新技术可供我国冰巨星环绕探测任务借鉴。

基于当前我国空间测控通信技术条件, 为适应冰巨星环绕探测任务需求, 应积极研究采用Ka频段发送遥测和载荷数据、提升星载和地面天线增益、降低地面系统噪声温度、减少地面设备解调损失等可提高遥测和数传码速率的方法, 使冰巨星探测任务整体测控能力达到世界先进水平。为满足深远距离的对地数传要求, 探测器高增益天线直径不低于3.75 m, 其波束角 θ 宽度为 $\pm 0.24^\circ$ 。

4.6 高精度自主导航设计

与近地卫星和月球探测器相比, 冰巨星探测的飞行距离远、运行时间长、环境未知性较强, 因此, 其对导航和控制系统在实时性、精度和可靠性方面的要求更高。传统的基于地面测控网的导航与控制方法受到精度、传输时间、运行成本和可观弧段等方面的限制, 已经越来越难以满足日益增多和距离更远的深空探测任务的需要。因此, 深空探测器自主导航与控制技术越来越受到重视和关注。但是, 目前发展的基于光学成像测量的深空自主导航与控制技术一般都是针对深空探测具体项目和具体任务阶段的需求发展的, 彼此相对独立, 缺乏系统性, 已有的自主导航系统还无法实现深空多任务段对不同天体观测的导航需要; 另外, 这种仅仅利用光学成像测量的自主导航方式也很难满足海王星探测对高精度和高可靠性的要求。

基于X射线脉冲星的自主导航技术已经通过了初步的验证, 正处在积极探索研究阶段, 但其无法提供相对目标天体的直接测量信息。因此, 需要研究满足冰巨星探测任务要求, 具有高精度、高容错能力和高可靠性的自主导航与控制技术。

此外, 冰巨星探测面临目标特性未知、导航信息有限、引力场复杂和飞行环境大尺度等新挑战, 深空探测器自主导航与控制仍存在重大技术瓶颈。

冰巨星探测器在深远空间未知环境中长时间运行, 运动状态与系统参数具有强不确定性, 且深远空间探测目标先验信息少, 探测器测量手段有限、实时获取测量信息不足, 导致传统导航方法难以满足探测器运动状态精确估计的要求。针对上述问题, 面向冰巨星环绕探测自主导航需求, 需研究高精度自主导航技术。在导航系统可观度研究方面, 通过分析导航系统在有效信息利用层面上的可观度边界, 形成复杂

表3 使命轨道参数

Table 3 Mission orbital parameter

圈数	周期(天)	近海高度(km)	远海高度(km)	海卫一最近距离(km)
1	84.17	3.24×10^5	3.81×10^6	100.12
2	22.09	2.86×10^5	1.38×10^6	395.52
3	12.07	2.56×10^5	8.41×10^5	842.95

环境多约束观测序列规划策略,建立快速收敛导航系统模型,采用并行和统一导航滤波器实现高精度高容错融合,能够实现深远空间环境下探测器运动状态的可靠估计,基本思路是强化观测量对状态估计误差的修正作用,并对弱可观状态进行解耦分离。

4.7 深远空间自主任务规划

对于冰巨星环绕探测任务,大尺度空间、长航时飞行过程姿态轨道规划与控制的自主智能化是实现自主安全探测的关键,需要针对轨道设计与控制技术进行深入研究,解决轨道机动时机、燃料消耗、飞行时长等综合优化问题。

冰巨星探测任务规划包含活动选择、时间表示、资源分配、约束满足、动作排序及优化等系统问题,使得探测器的规划与调度问题变得十分复杂。对于已有任务规划器,由于冰巨星环绕探测任务约束多,约束的表示、时间和资源的推理以及分配比较困难。如果仅仅使用调度器,尽管能够较好地处理时间和资源约束,但难以进行大量复杂的活动选择。为了适应未来探测的应用要求,要求将规划器和调度器结合到一个系统中进行。规划器负责选择机动以产生规划,调度器则负责在规划产生后进行约束检验和资源分配,控制模块负责协调规划器和调度器的工作状态。

4.8 大气进入探测任务设计

冰巨星环绕探测任务携带的大气进入器主要由进入平台和浮空器组成。进入平台由减速伞系统、防热外壳、结构与机构组成,用于进入海王星大气/亮斑/暗斑,获取大气结构、成分、内部活动等精细化信息。

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、酚醛浸渍碳烧蚀体、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(heat shield for extreme entry environment technology, 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。

5 冰巨星环绕探测实施建议

(1) 建议将海王星环绕探测任务作为优先重大任务上报,争取纳入国家相关规划。相比天王星,海王星涉及探索地外生命和生命起源,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,可对半人马小天体进行探测等,可以取得多项原创性科学成果。

(2) 建议通过一次任务实施冰巨星的环绕与大气进入探测,开展全球化、长时间重复观测,高起点完成探测任务。广泛凝聚国内外科学家共识,不断提炼和迭代冰巨星环绕探测的科学目标和探测形式,丰富任务的科学内涵,实现科学收益最大化。

(3) 冰巨星环绕探测任务周期长,技术难度大,建议开展海王星环绕探测任务的方案深化论证,提早进行相关技术布局。重点开展极远距离飞行器总体设计、空间能源、智能自主、极远距离通信等关键技术先期攻关工作,牵引行星探测技术发展,为航天强国建设和科技强国建设作出更大的贡献。

(4) 建议以冰巨星环绕探测作为背景任务,加快推进空间核电源研发与在轨应用,加快空间核电源研制能力建设,对支撑我国深空探测任务可持续发展,加快建设科技强国、实现高水平科技自立自强具有重大的战略意义。

6 总结

由于海卫一及其冰下海洋的存在,海王星探测具有更多的科学主题和科学价值,因此我们建议将海王星作为我国冰巨星探测任务的首选目标。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,实现海卫一抵近探测,获得冰巨星及其卫星磁层、生命演化、地下海洋、电离层等原创性科学成果。同时,开展30天文单位距离可达并长期观测的飞行器工程技术研究将牵引出一系列深空探测关键技术的发展,极大带动我国航天整体技术水平。面向未来,需进一步细化冰巨星环绕探测任务过程和方案设计,深入分析并量化指标,同步开展各系统详细设计,力争实现行星探测领域“原创突破、世界领先”。

推荐阅读文献

- Guillot T, Gautier D. Giant planets. Eprint Arxiv, 2009, 28: 439–464
- Arridge C S, Agnor C B, André N, et al. Uranus Pathfinder: exploring the origins and evolution of Ice Giant planets. *Exp Astron*, 2012, 33: 753–791
- Ip W H. New insights to the planetary formation process (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 1758–1761 [叶永烜. 行星形成. 科学通报, 2016, 61: 1758–1761]

- 4 Tian F. Habitable planetary environments and extraterrestrial life (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2093–2100 [田丰. 宜居环境与地外生命. 科学通报, 2016, 61: 2093–2100]
- 5 Smith B A, Soderblom L A, Banfield D, et al. Voyager 2 at Neptune: imaging science results. *Science*, 1989, 246: 1422–1449
- 6 Tyler G L, Sweetnam D N, Anderson J D, et al. Voyager 2 radio science observations of the Uranian System: atmosphere, rings, and satellites. *Science*, 1986, 233: 79–84
- 7 Tyler G L, Sweetnam D N, Anderson J D, et al. Voyager radio science observations of Neptune and Triton. *Science*, 1989, 246: 1466–1473
- 8 National Research Council of the National Academies. Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013–2022. Washington DC: The National Academies Press, 2011
- 9 Southwood D. Cosmic Vision: Space Science for Europe 2015–2025. ESA, 2005
- 10 Girija A P. A Flagship-class Uranus Orbiter and Probe mission concept using aerocapture. *Acta Astronaut*, 2023, 202: 104–118
- 11 Stone E C, Miner E D. The Voyager 2 Encounter with the Uranian System. *Science*, 1986, 233: 39–43
- 12 Yang M F, Zheng Y H, Ni Y S, et al. Progress and prospect in planetary exploration of solar system (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 2023, 43: 1–12 [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. 中国空间科学技术, 2023, 43: 1–12]
- 13 Amy S, Francis N, Richard C A. Uranus Orbiter and Probe Mission Concept Design Study Final Report. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2021
- 14 Abigail R, Brenda C, Kirby R. Neptune Odyssey: Mission to the Neptune-Triton System. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 2020
- 15 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. European Planetary Science Congress, 2013. 914
- 16 Smith T, He H Y, et al. The exploration of Neptune: a noble gas and volatile perspective. *J Deep Space Explor*, 2020, 7: 584–604
- 17 Griton L, Pantellini F, Meliani Z. Three-dimensional magnetohydrodynamic simulations of the solar wind interaction with a hyperfast-rotating uranus. *JGR Space Phys*, 2018, 123: 5394–5406
- 18 Tiscareno M S, Murray C D. Planetary Ring Systems: Properties, Structure, and Evolution. New York: Cambridge University Press, 2018
- 19 Dumas C, Terrile R J, Smith B A, et al. Stability of Neptune's ring arcs in question. *Nature*, 1999, 400: 733–735
- 20 Namouni F, Porco C. The confinement of Neptune's ring arcs by the moon Galatea. *Nature*, 2002, 417: 45–47
- 21 de Pater I, Gibbard S G, Chiang E, et al. The dynamic neptunian ring arcs: evidence for a gradual disappearance of Liberté and resonant jump of courage. *Icarus*, 2005, 174: 263–272
- 22 Fletcher L N, Helled R, Roussos E, et al. Ice giant system exploration within ESA's Voyage 2050. *Exp Astron*, 2022, 54: 1015–1025
- 23 Hendrix A R, Hurford T A, Barge L M, et al. The NASA roadmap to ocean worlds. *Astrobiology*, 2019, 19: 1–27
- 24 Fletcher L N, Helled R, Roussos E, et al. Ice Giant Systems: the scientific potential of orbital missions to Uranus and Neptune. *Planet Space Sci*, 2020, 191: 105030
- 25 Ness N F, Acuña M H, Behannon K W, et al. Magnetic fields at Uranus. *Science*, 1986, 233: 85–89
- 26 Ness N F, Acuña M H, Burlaga L F, et al. Magnetic fields at Neptune. *Science*, 1989, 246: 1473–1478
- 27 Bagenal F. Giant planet magnetospheres. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1992, 20: 289–328
- 28 Broadfoot A L, Atreya S K, Bertaux J L, et al. Ultraviolet spectrometer observations of Neptune and Triton. *Science*, 1989, 246: 1459–1466
- 29 Soderlund K M, Heimpel M H, King E M, et al. Turbulent models of ice giant internal dynamics: dynamos, heat transfer, and zonal flows. *Icarus*, 2013, 224: 97–113
- 30 Bridge H S, Belcher J W, Coppi B, et al. Plasma observations near Uranus: initial results from Voyager 2. *Science*, 1986, 233: 89–93
- 31 Anderson J D, Campbell J K, Jacobson R A, et al. Radio science with Voyager 2 at Uranus: results on masses and densities of the planet and five principal satellites. *J Geophys Res*, 1987, 92: 14877–14883
- 32 Stone E C, Miner E D. The Voyager 2 encounter with the Neptunian system. *Science*, 1989, 246: 1417–1421
- 33 Belcher J W, Bridge H S, Bagenal F, et al. Plasma observations near Neptune: initial results from Voyager 2. *Science*, 1989, 246: 1478–1483
- 34 Donahue B, Duggan M. The NASA Space Launch System: six future missions. In: 2023 IEEE Aerospace Conference, 2023. 1–10
- 35 Masters A, Achilleos N, Agnor C B, et al. Neptune and Triton: essential pieces of the Solar System puzzle. *Planet Space Sci*, 2014, 104: 108–121
- 36 Rymer A M, Runyon K D, Clyde B, et al. Neptune Odyssey: a flagship concept for the exploration of the Neptune–Triton System. *Planet Sci J*, 2021, 2: 184
- 37 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. In: European Planetary Science Congress, 2013. 914
- 38 Mousis O, Atkinson D H, Ambrosi R, et al. *In situ* exploration of the giant planets. *Exp Astron*, 2022, 54: 975–1013
- 39 Masters A. Magnetic reconnection at Uranus' magnetopause. *JGR Space Phys*, 2014, 119: 5520–5538

Summary for “冰巨星环绕探测任务设想”

Conceptual design of an ice giant orbital exploration mission

Mengfei Yang^{1*}, Chi Wang², Feng Gao³, Fanlu Bai³, Hui Li², Yuxian Wang², Wenqin Meng³ & Tong Wang³¹ China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China² National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China³ Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China* Corresponding author, E-mail: yangmf@bice.org.cn

Uranus and Neptune are key targets for investigating the origins of the solar system and planets. Moreover, due to the subsurface ocean on Triton, the Neptune system is also regarded as a breakthrough avenue for the search for extraterrestrial life and the origins of life, offering rich scientific value. Currently, only the Voyager program has conducted short-duration flyby observations of the ice giants, yielding limited scientific results. Implementing higher-level missions, such as orbital exploration of the ice giants and long-term observations, to study the morphology of target celestial bodies, planetary rings, atmospheric structure and composition, atmospheric dynamics, magnetospheres, ionospheres, and subsurface oceans can fill many gaps across space physics, space astronomy, and planetary science. With China's enhanced deep-space exploration capabilities and major progress in space nuclear power technology, the technical foundation is now in place to carry out orbital exploration of the ice giants. However, ice giant missions face enormous challenges, including long travel distances, extended mission durations, multiple targets, and unknown environments. There is an urgent need to develop spacecraft technologies capable of reaching 30 astronomical units and conducting long-term observations, driving advances in areas such as trajectory design, power systems, TT&C and data transmission, autonomous navigation, and spacecraft autonomous management. The characteristics of ice giant exploration targets and the international progress in ice giant missions are analyzed in this paper. Considering Neptune and Triton's unique value for studies of extraterrestrial habitability, Neptune is identified as the preferred target for the ice giant orbital exploration mission. This paper defines three main scientific objectives for ice giant orbital exploration: studies of atmospheric and geological activity in ice giant systems; investigations of the space environment of ice giant systems; and exploration of Triton's subsurface ocean. Centered on these scientific goals, this paper specifies that the mission will carry 11 scientific instruments across four categories: fields and waves measurements, particle detection, optical remote sensing, and gas composition analysis. In terms of mission design, it proposes a concept to achieve Neptune orbital exploration, atmospheric entry, and close flybys of Triton within a single mission, and presents a preliminary spacecraft design. The probe will use two RTGs with 300 We electrical output each (initial total power consumption of 600 We), enabling it to reach 30 astronomical units and operate the long-term scientific exploration. Launch is planned around 2033, with arrival at Neptune after 15 years to conduct scientific observations, and with opportunities for Triton flybys and remote sensing. Based on the mission profile and technical challenges, this paper provides a detailed analysis of technology pathway choices in space nuclear power, ultra-long-distance communications, high-precision autonomous navigation, autonomous mission planning, and atmospheric entry, and offers implementation recommendations for China's ice giant orbital exploration, providing valuable reference for subsequent mission formulation.

ice giants, orbital exploration, planetary science, deep space explorationdoi: [10.1360/CSB-2025-0661](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0661)