

http://zgkj.cast.cn

DOI: 10.16708/j.cnki.1000-758X.2025.0049

冰卫星宜居性探测任务构想

陈晓^{1,2,*}, 李奎^{1,*}, 郝记华¹, 陈刚¹, 杜洋², 庞涪川¹, 李东禹², 李海洋^{1,2}

1. 深空探测实验室(天都实验室), 合肥 230031

2. 上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要: 探测冰卫星冰壳下的液态海洋、探索冰卫星的宜居性可为了解太阳系的起源、演化、生命起源和地外生命探索提供重要的线索和信息,也是当前国际深空探测最受关注的领域之一。在对国内外冰卫星探测任务及主要成果进行归纳总结的基础上分析了发展趋势,总结了冰卫星探测任务的科学目标与探测手段,提出了采用环绕+着陆+深钻探测的组合探测任务构想,通过探测土卫二的重力场、温度场、磁场、以及潜在的地震波、质谱、色谱、光谱等信息,同时采集土卫二的自然样品并且分析其元素和同位素组成,探索冰卫星土卫二的宜居性,并梳理了亟待突破的新型探测载荷、生源元素高精度探测等关键技术。通过规划实施冰卫星探测任务,可提升中国深空探测技术水平和在行星科学领域的地位。

关键词: 冰卫星; 宜居性; 液态海洋; 任务构想; 探测目标

中图分类号: V476.4

文献标识码: A

Conception on the habitability exploration mission of the icy moon

CHEN Xiao^{1,2,*}, LI Kui^{1,*}, HAO Jihua¹, CHEN Gang¹, DU Yang², PANG Fuchuan¹, LI Dongyu², LI Haiyang^{1,2}

1. Deep Space Exploration Laboratory (Tian Du Laboratory), Hefei 230031, China

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

Abstract: The exploration of liquid oceans beneath the icy crusts of icy moons and the investigation of their habitability provide critical clues for understanding the origin and evolution of the solar system, the emergence of life, and the search for extraterrestrial life. This field has become one of the most prominent frontiers in international deep space exploration. Based on a comprehensive review of domestic and international icy moon exploration missions and their key achievements, current development trends are analyzed, the scientific objectives and detection methodologies for icy moon exploration are summarized, and a novel multi-mode exploration concept is proposed combining orbital reconnaissance, surface landing, and deep drilling. Focusing on Enceladus as a primary target, the mission aims to investigate its gravitational field, thermal profile, magnetic environment, potential seismic activity, and geochemical characteristics through mass spectrometry, chromatography, spectroscopy, and biological detection. Concurrently, it will collect natural samples to analyze elemental and isotopic compositions, thereby advancing our understanding of Enceladus' habitability. Critical technologies requiring breakthroughs are further identified, including next-generation detection payloads and high-precision analysis of biogenic elements. The implementation of such icy moon exploration missions will significantly enhance China's technological capabilities in deep space exploration and strengthen its leadership in planetary science.

收稿日期: 2024-01-19; 修回日期: 2024-06-12; 录用日期: 2024-07-09

基金项目: 深空探测实验室前沿科研计划项目(2022-QYKYJH-HXYF-023); 国家自然科学基金青年基金(12102265); 上海市青年科技英才扬帆计划(21YF1446100)

*通信作者. E-mail: xchen509@126.com; likui2017@qq.com

引用格式: 陈晓, 李奎, 郝记华, 等. 冰卫星宜居性探测任务构想 [J]. 中国空间科学技术 (中英文), 2025, 45 (4): 175-184.
CHEN X, LI K, HAO J H, et al. Conception on the habitability exploration mission of the icy moon [J]. Chinese Space Science and Technology, 2025, 45 (4): 175-184 (in Chinese).

Keywords: Icy Moon; Habitability; liquid ocean; mission concept; target of detection

0 引言

冰卫星是指表面主要由冰体构成的卫星，是太阳系中一类特殊的天然卫星。

冰卫星的冰层可以是水冰、氨冰、氮冰、甲烷冰等，冰层之下可能存在局部或全球性的液态水海洋，其内核则可以是岩石、金属或者混合物。在压力较高的情况下，冰卫星的内部也可能存在一层或多层高压的冰^[1-2]。冰卫星表面通常呈现出丰富的地形和地貌，如山脉、峡谷、撞击坑、裂谷等，一些冰卫星上还存在着冰火山和喷泉现象，这些地形特征为探索冰卫星的演化历史提供了重要线索。

目前已知的冰卫星集中在木卫和土卫，包括木卫二（Europa）、木卫三（Ganymede）、木卫四（Callisto）、土卫二（Enceladus）和土卫六（Titan）等；天王星、海王星、冥王星周围也被认为存在一些冰卫星，如天卫二、天卫五与海卫一等，但尚未得到较多观测与研究^[3-4]。

冰卫星是太阳系中除地球外最有可能存在碳基生命的天体之一，具有非常独特的探测价值。对冰卫星的研究可以为了解太阳系的起源、演化、生命起源和地外生命探索提供重要的线索^[5-6]，探测冰卫星的宜居性是探索地外生命宜居环境的重要途径，也是当前国际上深空探测最前沿、最受关注的领域之一。

近年来，随着探测技术发展，国外的冰卫星探测任务得到了迅速推进，取得了许多开创性的成果。

1 国内外冰卫星探测现状

1.1 国外冰卫星探测研究现状

自 20 世纪 70 年代以来，NASA 和 ESA 组织开展了多个涉及冰卫星探测的任务，详见表 1。

这些探测任务在冰卫星探测和研究方面取得了丰富的、开创性的科研成果。当前冰卫星

空间探测任务的主要情况如下：

1) “旅行者” 2 号（Voyager 2）是美国于 1977 年发射的星际航天器，首次发现了木卫三和土卫六上的冰山，并分别对其表面结构和可能存在的液态水海洋进行了探测。

2) “伽利略” 号（Galileo）是美国于 1989 年发射的深空探测器，是首个进行木星大气探测的航天器，发现了木卫二、木卫三、木卫四次表层盐水层存在的证据；木卫二可能存在液态水海洋，并且在其南极地区有一些喷发口，可以喷出水蒸汽和冰粒子^[8]，揭示了其表面的细节特征，如裂缝、峡谷、冰山、火山喷发等，帮助科学家更好地理解冰卫星的形成和演化过程；发现了木卫二的磁场，这是第一个被观测到的冰卫星磁场^[9-10]。

3) “卡西尼-惠更斯” 号（Cassini-Huygens）是美国和欧洲于 1997 年联合发射的土星探测器，它发现了土卫二上存在一条狭窄的喷流，喷流向外喷射出尘埃和水蒸汽，这可能是源自冰卫星内部液态海洋的现象，揭示了土卫二南极地区存在大量冰物质的喷发现象；发现土卫四和土卫八表面的峡谷地貌可能是由于冰壳内部的液态海洋在地质时间尺度上对冰壳表面造成的改变所导致；惠更斯着陆器成功降落在土卫六表面，并传回了首批来自该星球表面区域特征及其大气层结构与组成等方面信息。此外，发现土卫二上存在喷泉或喷气现象，这些对于形成和维持土星环系具有重要作用^[11-12]。



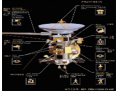
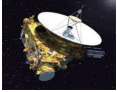
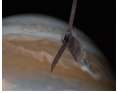



4) “新地平线” 号（New Horizons）是美国于 2006 年发射的深空探测器，首次直接对冰卫星木卫二进行探测，揭示了其表面复杂的裂谷、山脉、冰川和陨石坑等地貌特征；探测了其大气层和磁场以及可能存在的冰下海洋；成功飞越了冥王星，揭示其表面具有枝状网络和貌似池塘的特征，暗示着其地表过去有可能存在液氮；发现其表面存在形成年代较近的，成分为甲烷、一氧化碳和氮冰的流动冰川；发现了冥王星上的冰山、冰块、陨坑，乃至积雪及云层^[13-14]。

5) “朱诺” 号（Juno）是美国于 2011 年发射的木星探测器，近距离飞越了木星的冰卫星-木卫二，获得了其表面部分有史以来最高分辨率

的图像，并收集了有关木卫二内部、表面成分和电离层的宝贵数据，以及它与木星磁层的相互作用；发现离木星赤道越近，水就越丰富。在木星

赤道附近，水占木星大气中分子的 0.25%，几乎是太阳的三倍（以水分子的成分来衡量，而不是液态水本身）^[15]。

表 1 国外冰卫星探测任务概览表
Table 1 Overview of the foreign icy moon exploration missions

Task code	Detector	Country	Organization	Time	Mass/kg	Life/year	Form	Target
Voyager2		US	NASA	1977-08-20	722	40	Overflight	Jupiter, Saturn, Uranus, Neptune, Kuiper Belt
Galileo		US	NASA	1989-10-18	2223	14	Surround and enter	Jupiter and its moons
Cassini-Huygens		US/EU	NASA/ESA	1997-10-15	5712	20	Surround and enter	Saturn and its moons
New Horizons		US	NASA	2006-01-19	478	32	Overflight	Pluto and its moons, the Kuiper Belt
Juno		US	NASA	2011-08-05	3625	14	Surround	Jupiter and its moons
JUICE		EU	ESA	2023-04-14	5963	12	Overflight and Surround	Jupiter and its moons
Europa Clipper		US	NASA	2024-10-14	6000	—	Overflight	Jupiter and Europa
Dragonfly		US	NASA	2028-07	450	—	Enter and land	Titan

6) 木星冰卫星探测器（JUICE）是欧洲空间局于 2023 年 4 月发射的且正在实施中的木星系探测任务，旨在系统探索木星系中冰卫星的宜居性潜力及太阳系形成机制。该探测器计划 2031 年抵达木星，并于 2034 年 12 月进入环木卫三轨道，将成为首个环绕气态巨行星卫星运行的探测器，以木卫三为核心研究对象，并与木卫二和木卫四进行对比观测，着重于生命必备的化学条件，包括有机分子、表面特征的形成等研究。另外，该探测器还将首次进行冰卫星地下探测，确定最近活跃地区的最小冰壳厚度^[16-17]。

7) 欧罗巴快船（Europa Clipper）是美国国家航空航天局主导的木卫二探测任务，已于 2024 年 10 月 14 日由猎鹰重型火箭成功发射，

并于 2025 年 3 月 1 日完成首次火星引力辅助加速。目前正以每秒 35 km 的速度飞向木星系统，计划于 2030 年抵达木星轨道，于 2031 年启动对木卫二的 49 次近距离飞越探测。该任务将对木卫二表面、内部结构、海洋特征、地质活动以及生命潜力等方面进行探测，重点是探索木卫二上生命所需的三大条件：液态水、生命组分和能量来源。主要研究目标有三个：一是探测冰壳和海洋，确认冰层内或冰层下水的存在，并描述其性质，以及表面冰与海洋交换的过程；二是物质成分探测，包括主要生源元素的分布和化学构成以及与海洋成分的联系；三是地质学探测，包括地表特征的特点和形成、最近或当前活动的地点、宜居性等^[18-19]。

8) “蜻蜓”号（Dragonfly）任务是美国国

家航空航天局“新边疆计划”下的土卫六探测项目。该项目由约翰·霍普金斯应用物理实验室（APL）负责探测器研制与运营，计划于2028年7月由“猎鹰重型”火箭发射升空，预计2034年抵达目标——土星最大的卫星土卫六（泰坦）。探测器采用核动力旋翼飞行器的创新形式，配备放射性同位素热电发生器（RTG），利用土卫六低重力（地球1/7）和稠密大气（地球4倍）的优势，实现短途飞行与多点采样。其科学目标聚焦于三大方向：一是研究土卫六表面有机分子分布及甲烷循环系统，分析其大气（98%氮气、甲烷为主）与地表液态碳氢化合物湖泊的相互作用；二是通过采样不同地质区域（如火山口、沙丘），解析复杂有机物的形成路径，模拟地球早期生命起源的化学条件；三是探测是否存在以液态甲烷或水为介质的微生物活动痕迹，拓展对太阳系生命可能形式的认知。

1.2 国内冰卫星探测研究现状

目前，国内在冰卫星探测方面的研究相对较为薄弱，尚未规划实施具体的冰卫星探测任务，但在相关技术领域的研究和发展也取得了一定的进展，主要包括探月工程和探火工程。2007年至2022年间成功实施的嫦娥系列月球探测任务，发现月球表面可能有水冰的存在^[20]，对月球表面的冰分布情况进行了研究和探测；2020年成功发射的天问一号，其着陆器搭载的“祝融号”火星车通过火星表面的巡视探测，发现早期火星曾存在大量液态水，后来伴随火星早期大气逸散，气候环境发生了重大转变，极低的气压和水汽含量导致今天火星上液态水难以稳定存在。不过，有研究表明当前火星高纬度地区夏季可以出现含盐液态水。近期，中国科研人员利用“祝融号”搭载的导航地形相机、多光谱相机和火星表面成分探测仪，首次发现着陆区沙丘表面富含含水硫酸盐、蛋白石、含水铁氧化物等物质成分^[21]。除了这些任务外，中国在已出版的《2016-2030年空间科学规划研究报告》中提出中国计划在2030年前后执行天问四号任务，该任务科学目标包括研究木卫四（Callisto）的冰层形貌及潜在海洋等^[22]。目前，尚未规划专门针对冰卫星的探测任务。

1.3 任务特点及发展趋势

冰卫星宜居性探测任务是空间科学研究的重要方向之一，对于了解太阳系的水资源分布、行星形成和生命起源等问题具有重要意义，是世界各国深空探测的热点领域。同时，冰卫星探测任务属于深空探测的范畴，具有工程技术复杂度高、可靠性要求高、寿命要求长、资金投入大等特点，为实现效益最大化，冰卫星探测任务正朝着下述几个方向发展。

1) 冰卫星探测任务更明确。以往的探测任务往往是对其他天体探测或多目标探测过程中，对冰卫星的顺路探索式探测，并未有专门针对冰卫星的探测任务。近年来，随着探索的不断深入，冰卫星的巨大探测价值逐渐被重视，欧洲规划实施了专门针对冰卫星的木星冰卫星探测器，美国也正在开展其首个专门针对冰卫星的欧罗巴快船任务，并计划实施“蜻蜓”号土卫六探测器。国内外对冰卫星探测的重视程度可见一斑。

2) 冰卫星探测科学目标不断丰富。以往的探测任务的科学目标主要是对冰卫星的地形和地貌特征、磁场环境、大气结构及组成、表面结构等方面的初步探测，而欧美正在实施及已规划的冰卫星探测任务则逐渐转向针对冰卫星的最近活跃冰壳厚度、物质成分、宜居性、圈层结构特征、海洋化学成分及潜在生命信号、圈层之间的相互作用、起源和演化过程等科学目标开展探测。

3) 冰卫星探测手段不断提升。以往主要是依赖常规的光学、紫外、红外相机拍摄图像等遥感手段进行探测，美国和欧洲正在开展及已经规划的冰卫星探测任务正在逐渐应用穿冰雷达、冰面软着陆、冰层深钻、冰下潜航等新型探测手段^[23-25]，见图1。

2 冰卫星探测任务科学目标与探测手段分析

2.1 冰卫星的圈层结构特征

不同冰卫星具有丰富的圈层结构特征，而目前有限的理解主要基于为数不多的遥感探测

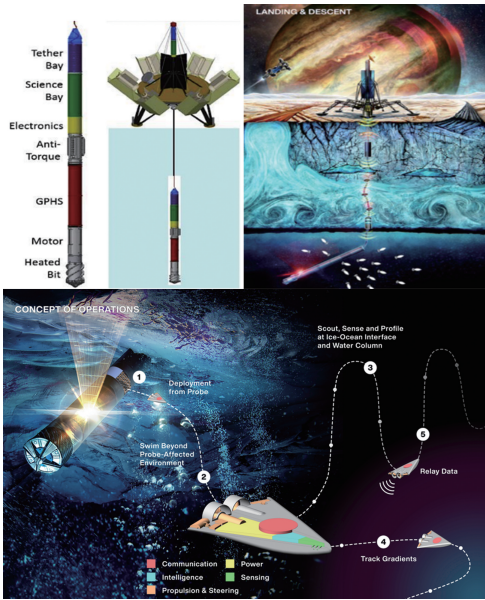


图 1 新型冰卫星探测手段示意
Fig. 1 Schematic diagram of the new method for the icy moon exploration.

数据结合理论模型和模拟实验。例如，对于部分半径较小的冰卫星，前人研究表明其核部可能并没有发生核幔分异，而是维持一个类球粒陨石的成分特征；而对于部分半径较大的冰卫星，则被认为发生了核幔分异，并且有的会产生内秉磁场。由于冰卫星具有较小的温度梯度，并且含水量较高，部分较大的冰卫星甚至会在其内部形成一层或若干层高压的冰。对于冰卫星圈层结构的详细解读不仅会为理解冰卫星的宜居性演化特征提供重要线索，而且会对解答行星磁场的成因等重大科学问题提供参考。

对于冰卫星圈层结构的理解需要探测冰卫星的重力场、温度场、磁场以及潜在的星震波等信息。

2.2 冰卫星海洋的化学成分及潜在生命信号

冰卫星是太阳系中除地球以外另一类存在全球性液态水海洋的星体。欧美有限的探测器发现冰卫星海洋的成分类似于地球生命起源的化学组成，并且富含有机物，被认为是地外最有可能发现生命信号的星体。目前，对于冰卫星宜居性的研究已经成为行星科学领域的世界科技前沿，被列为美国未来 10 年深空探测任务的最优先任务之一。对于冰卫星冰下海洋的化学成分，尤其是生命构成元素的认识，有望解

答冰卫星的生命宜居性前沿科学问题，并且取得地外生命信号探索的巨大科学突破。

对于冰卫星海洋化学成分及潜在生命信号的探测需要质谱、色谱、光谱等一系列化学和生物探测手段。

2.3 冰卫星圈层之间的相互作用

虽然组成与行星体系不同，冰卫星的各个圈层之间被认为也存在多种相互作用过程。例如，前期的冰卫星遥感探测表明冰卫星表面反照率很高，并且存在多种多样的形貌学特征，表明冰卫星表面存在较快的更新过程。此外，卡西尼号对土卫二的喷出物测试表明了富含 SiO₂ 的化学特征，暗示冰下存在活跃的热液活动。这些过程为维系冰卫星各圈层之间的物质和能量交换提供了重要纽带，也是维持冰卫星宜居性的重要因素。

对于冰卫星各个圈层之间的相互作用的理解需要精确探测冰卫星表面的形貌特征以及水冰的喷出速率、通量、成分等特征。

2.4 冰卫星的起源和演化过程

相比于上述科学目标，冰卫星的起源和早期演化过程是其中理解的最少的方向，尤其是冰卫星的起源过程及时间，与母星起源过程的关系，冰卫星在演化过程中的能量、物质及结构等演变特征等。但是，相关问题的解答会为理解太阳系的起源和早期演化提供最直接、关键的线索。基于现有的探测技术和手段，收集冰卫星的自然样品并且分析其元素和同位素组成将有助于理解冰卫星的起源和早期演化过程。

3 中国冰卫星宜居性探测任务构想

3.1 任务总体设计

土星是太阳系第二大行星，保留着大量的太阳系形成时的原始物质，拥有百余颗卫星，其中土卫二上存在冰下海洋，具有极大的科学研究价值。根据卡西尼-惠更斯号的探测结果，土卫二南极地区冰盖厚度仅 1.2~5.1 km，并且呈现随

纬度梯度变化特征^[1]，这为探测冰卫星的冰层下的液态海洋提供了非常有利的条件。土星距离太阳约 9.58 AU，其公转轨道上太阳辐照强度极弱，对探测器的能源、通信、动力、自主运行、寿命提出极高要求。受限于天体运行规律，如何缩短飞行时间、实现土星环绕、兼顾多天体探测等，对探测任务的顶层方案、大系统配置等提出众多严苛的技术难题。此外，美国 NASA 行星科学和天体生物学的十年战略（2023-2032）^[26-27]中，八项新疆界（New Frontiers，NF）优选任务中有三项涉及土星系统，欧洲的远航 2050 空间科学战略规划中，也将土星的卫星探测列为大型任务三项科学方向之首，而中国已经规划的行星探测重大工程中并未覆盖土星系统，尚未有针对土星系的探测任务规划，及时开展以土星系统为目标的就位探测，突破系列关键技术，可以大大提升中国在空间科学领域的地位。

因此，对中国首次冰卫星宜居性探测任务做出如下构想。

(1) 探测对象

考虑到冰卫星宜居性探测任务的探测重点是针对冰卫星冰层及其冰下海洋进行探测，而土卫二是已知的冰层下存在液态海洋的冰卫星，且其南极冰层下可能存在液态水。因此，土卫

二是可作为优选探测对象。同时，兼顾对土星及其卫星系统进行飞越/环绕、着陆综合探测，通过单次任务完成多个目标天体的探测，使首次冰卫星宜居性探测任务的探测成果最大化，提升任务的效费比。

(2) 探测科学目标

1) 探测土卫二的重力场、温度场、磁场、以及潜在的地震波等信息，加深对冰卫星的圈层结构特征的理解，研究土卫二宜居性演化特征的线索和磁场的成因等重大科学问题。

2) 探测土卫二的质谱、色谱、光谱等信息及生物探测，研究土卫二冰层下的液态海洋化学成分及潜在生命信号。

3) 探测土卫二表面的形貌特征以及水冰的喷出速率、通量、成分等特征，研究冰卫星土卫二各个圈层之间的相互作用。

4) 采集土卫二的自然样品并且分析其元素和同位素组成，研究冰卫星土卫二的起源和早期演化过程。

(3) 任务载荷配置

根据上述探测任务的科学目标，基于获取尽量多关于冰卫星土卫二的液态海洋宜居性的相关数据的原则，结合现有的探测手段和技术，确定载荷初步配置，详见表 2。

表 2 冰卫星宜居性探测任务载荷配置

Table 2 Configuration of payload for habitability exploration mission of the icy moon		
Scientific Targets	Physical Quantity	Payloads Configuration
Characteristics of ring structure and magnetic field origin of the icy moon	Gravity field, temperature field, magnetic field, seismic wave	Laser interferometer, magnetometer, infrared imaging spectrometer, seismometer
Chemical composition and potential life signals of the liquid ocean of the icy moon	Mass spectrum, spectrum, energy spectrum, image, chemical composition of substance	Mass spectrometer, panchromatic/multispectral camera, Ultraviolet imaging spectrometer, substance detection radar
Interactions between layers of the icy moon	Image, water ice ejection rate, flux, composition	Panchromatic/ multispectral camera, X/ gamma -ray spectrometer, particle detector
The origin and evolution of the icy moon	elemental and isotopic composition	Panchromatic/multispectral camera, X/gamma-ray spectrometer, mass spectrometer, particle detector

作为中国首次冰卫星宜居性探测任务，从获取数据的角度，应携带尽量多的载荷，考虑

分辨率的层次梯度，但在后期实际工程实施时，可以根据最终项目确定的科学目标，合理的进

行载荷配置, 综合考虑质量、尺寸、功耗等因素, 以效益最大化的方式实现冰卫星宜居性探测任务。

(4) 探测形式

考虑到土卫二冰壳厚度与冰下海洋的隐蔽性, 导致传统的单一探测手段存在根本性局限——环绕遥感仅能通过羽流间接推测海洋成分, 数据可信度不高; 着陆器受限于浅层采样, 无法触及冰-海界面。因此, 综合考量冰卫星宜居性探测的科学目标和技术协同需求, 提出采用“环绕遥感+着陆详查+钻探验证”的三级综合协同探测形式。

在协同探测过程中, 环绕遥感数据为着陆及钻探选址提供依据, 着陆原位探测为遥感数据提供局部精细数据参考, 钻探探测实现冰卫星冰下垂直维度穿透, 获得直接样本数据, 三者可形成“面、线、点”全维度探测, 数据逐级验证, 系统性解决“遥感盲区-浅表干扰-样本缺失”的瓶颈, 将有效提升宜居性评估可信度, 实现从遥感推测到实证研究的跨越, 为地外海洋生命探测确立新标准。

探测器采用“环绕器+着陆器+深钻机器人”多器组合的形式, 通过一次任务完成土卫二的环绕+着陆+深钻探测, 同时兼顾土星的环境探测和其他土卫的飞越探测。探测任务飞行过程如图 2 所示。环绕器搭载激光干涉仪和亚毫米波辐射计等载荷, 实现全球尺度冰盖遥感与反演。着陆器装载热流探针和宽频地震仪等载荷, 对浅层冰体原位分析, 建立局部区域三维热-力耦合模型。深钻机器人采用同位素加热钻头, 突破极低温环境下 5km 量级冰层穿透, 实现冰-海界面直接取样与生源元素检测。

3.2 任务关键技术分析

冰卫星宜居性探测主要探测土卫二冰壳下的液态海洋, 其冰壳层较厚且距离地球较远, 任务飞行时间较长, 需要解决一系列探测载荷、轨道设计、能源、高度自主化的探测器等关键技术。

(1) 新型探测载荷技术

为实现土卫二液态海洋的探测, 需要对土卫二的冰壳进行深钻探测, 研发新型探测载荷,

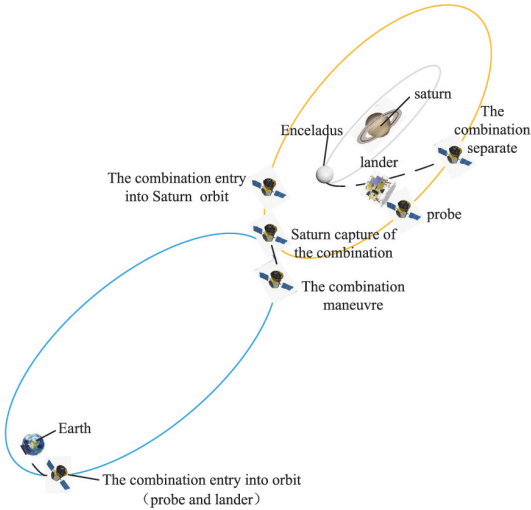


图 2 冰卫星宜居性探测任务飞行过程
Fig. 2 Flight process of the icy moon exploration mission

如钻冰潜航探测载荷等。现有深钻技术面临公里级冰壳厚度和 -180°C 量级的低温挑战。如果仅依靠传统太阳能电池板供电, 将难以实现数公里厚的冰壳深钻。有必要采用小型模块化核裂变反应堆作为潜在的能源方案。同时考虑到传统机械钻探存在磨损和碎屑转运问题, 在穿冰方法上建议采用热法+激光的混合穿透方法。激光穿冰可解决热法在冰表的真空闪蒸问题, 而热法穿透可以利用核裂变反应堆辐射的废热, 既避免了钻具机械损耗带来的寿命问题, 也不需要考虑碎屑转运。通过在整个钻冰潜航过程持续实施物理或化学参数就位探测, 可以更准确地了解冰卫星冰下环境的组成、分布、储量等, 为了解冰卫星的组成、物质成分、生命信息、资源勘探提供重要的技术支持。

(2) 生源元素高精度探测技术

为实现对冰卫星土卫二的宜居性探测, 需要对土卫二的液态海洋的六大生源元素 (C、H、O、N、P、S) 含量及存在形式进行分析, 寻找利于生命的起源和微生物生存的证据, 为可能的生命信号提供科学参考。

而该技术的难点在于土卫二作为一个营养系统, 即使存在生命, 其强生源性信号可能性较低, 而发现营养元素等生源性不强的生命信号可能性更高。这些环境参量可能来自于“生命过程”, 也可来自于“非生命过程”, 这可能导致假阳的结果, 需要进行生源性分析。因此, 有必要综合典型生命信号的各类模式, 构建生

命信号检测的专家系统,避免由于单一信号生源性不强导致假阳或者假阴的结果,提高在地外未知环境和有限探测窗口下生源信号检测的可信度。

在任务设计中采用“环绕遥感+着陆详查+钻探验证”,通过对全局环境参量探测,发现强生源信号区域,然后逐级递进详查,通过对样品进行前处理(分离、富集等)、高灵敏度的分析技术(质谱、光谱)、高精度数据处理等手段来实现生源元素高精度探测。该技术将在揭示冰卫星的生源元素组成、化学过程、生物生存条件、生态系统的运作机制方面具有巨大的应用价值。

(3) 低能量复杂转移轨道技术

在对冰卫星土卫二进行宜居性探测的任务中,探测对象距离地球遥远,需要设计低能量转移轨道;同时土星及其卫星系统引力摄动复杂,轨道稳定性低,轨道设计与科学目标的耦合性强,需要开展精确、高效的轨道设计优化,并具备快速、精密的轨道控制能力。

对此,可通过迭代和优化,研究复杂序列多目标探测任务轨道设计,突破低能量转移、多动力模型轨道拼接、短周期的复杂序列多目标探测轨道优化设计等,降低任务燃料消耗,实现任务效益最大化。进一步地,根据土卫二羽流喷发实时数据,调整飞掠高度,设计快速切入与拉起轨道,优化飞掠角度和速度,在喷发后最大限度捕获悬浮有机分子,实现对羽流成分(如甲烷、二氧化碳)的精确分析。

(4) 高效能源获取技术

探测器携带载荷多、飞行距离远、飞行时间长、测控通信及数传等对功耗要求高,且需要完成对冰卫星土卫二的冰壳进行深钻,能源需求巨大。而另一方面,土星轨道太阳常数仅 14.9 W/m^2 ,传统的太阳能供电方式无法满足探测器能源需求,需要开发高效的能源供应技术。可采用的能源方式有小型化核裂变反应堆或者同位素热电转换装置等。根据土卫二探测任务的环境特点,探索利用冰卫星土卫二的潮汐能进行能源供应,摆脱能源系统的束缚也可能是一项价值极高的技术途径。

(5) 高度自主运行与探测技术

土卫二宜居性探测任务的器地距离较远,存在与地球通讯延迟长、通信带宽小、通信窗口约束多等工程约束,无法实现频繁的人在回路控制和高通量数据交换,需要探测器具有高度自主的航行及运行管理能力,在无地面控制干预的情况下自主完成探测任务。

自主导航方面,环绕器/着陆器可在地面无无线电测量的基础上,采用天文光学导航技术实现飞行关键过程中自主导航。但对于深钻潜航器,将面临无线电信号被冰壳或海洋阻断,冰下海洋没有先验信息的情况,可采用惯性导航(IMU)、同步定位与建图技术(SLAM)或者基于着陆器声学信号进行导航定位。

自主运行与探测方面,探测器将历经轨道空间、星球表面、冰壳、海洋等多场景。探测器可根据不同阶段或场景的数据特性,自主调用不同工作模式,实现对不同的探测对象的数据采集和分析,并自主对重要数据进行筛选、排序和传输,以实现复杂的生命探测任务。

低能量复杂转移轨道技术、高效能源获取技术、高度自主运行与探测技术均为深空探测领域共性关键技术,具有巨大的工程应用价值,可保障冰卫星宜居性探测任务的能量供应、自主任务管理、降低燃料消耗、延长探测器寿命、提升探测任务效费比,为后续任务的顺利实施提供有力的技术支撑。

4 结论与展望

对冰卫星的宜居性探测具有重要科学价值,是空间科学研究的重要方向之一。中国应结合后续深空探测任务规划,论证实施中国首次冰卫星探测任务,对土卫二等冰卫星的冰壳下的液态海洋进行探测,对于我们了解行星形成、探索冰卫星宜居性、冰卫星圈层结构及相互作用、地外生命探索、生命起源等空间科学问题具有重要意义。对此,本文面向土卫二宜居性探测任务,给出了科学目标和载荷配置方案,提出了“环绕器+着陆器+深钻机器人”多器组合探测方案,梳理了深钻下潜载荷、生源元素探测载荷等新型载荷技术、低能量复杂转移轨道技术、高效能源获取技术、高度自主运行

与探测等关键技术。通过逐步开展相关技术和方案的深化研究,开展专项探测任务,将有效提升中国深空探测技术水平。

参考文献 (References)

- [1] GUSEV G A, LOMONOSOV B N, RYABOV V A, et al. Ice satellites of planets of the Solar System and the on-orbit radio detection of ultrahigh-energy particles [J]. *Physics-Uspekhi*, 2010, 53 (9): 923-938.
- [2] TYLER R. Comparative estimates of the heat generated by ocean tides on icy satellites in the outer Solar System [J]. *Icarus*, 2014, 243.
- [3] CANUP R M, WARD W R. Origin of Europa and the Galilean satellites [M]. Tucson: University of Arizona Press, 2009: 59-83.
- [4] ROSALY L, ROBERT M N. Surface features on Titan form like Earth's, but with a frigid twist [C]. *Proceedings of the International Astronomical Union Symposium*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 1-10.
- [5] 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).
- [6] MITCHELL J L, LORA J M. The climate of Titan [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2016, 44: 353-380.
- [7] BURATTI B J. Application of a radiative transfer model to bright icy satellites [J]. *Icarus*, 1985, 61 (2): 208-217.
- [8] JOHNSON T V. Geology of the icy satellites [J]. *The Outer Planets and their Moons*. 2005: 401-420.
- [9] TEOLIS B D, JONES G H, MILES P F, et al. Cassini finds an oxygen - carbon dioxide atmosphere at Saturn's icy moon Rhea [J]. *Science*, 2010, 330 (6012): 1813-1815.
- [10] ARNOLD H, LIUZZO L, SIMON S. Magnetic signatures of a plume at Europa during the Galileo E26 flyby [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46 (3): 1149-1157.
- ZOU X, PENG J, MIAO Y M. Research and prospect of scientific exploration for Jovian system [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43 (6): 1-10 (in Chinese).
- [11] MATSON D L, SPILKER L J, LEBRETON J P. The Cassini-Huygens mission to the Saturnian system [J]. *Space Science Reviews*, 2002, 104 (1-4): 1-58.
- [12] BROWN R H, LEBRETON J P, WAITE J H. Titan from Cassini-Huygens [M]. Springer. 2009: 35-59.
- [13] WEAVER H A, BUIE M W, BURATTI B J, et al. The small satellites of Pluto as observed by New Horizons [J]. *Science*, 2016, 351 (6279): 1281-1285.
- [14] VERBISCER A J, PORTER S B, BURATTI B J, et al. Phase curves of Nix and Hydra from the New Horizons imaging cameras [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2018, 852 (2): L35.
- [15] MOLYNEUX P M, GREATHOUSE T K, GLADSTONE G R, et al. Ganymede's UV Reflectance from Juno - UVS Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49 (23): e2022GL101357.
- [16] GRASSET O, DOUGHERTY M K, COUSTENIS A, et al. Jupiter Icy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterize the Jupiter system [J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 78: 1-21.
- [17] PHILLIPS C B, PAPPALARDO R T. Europa clipper mission concept: Exploring Jupiter's ocean moon [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2014, 95 (20): 165-167.
- [18] BAYER T, BITTNER M, BUFFINGTON B, et al. Europa clipper mission: Preliminary design report [C]. 2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2019: 1-24.
- [19] CAMPAGNOLA S, BUFFINGTON B B, LAM T, et al. Tour design techniques for the Europa Clipper mission [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2019, 42 (12): 2615-2626.
- [20] 杨阳, 王庆功, 王超, 姚伟. 可持续性月球水资源提取利用设计与分析 [J]. *中国空间科学技术*, 2023, 43 (6): 100-111.
- YANG Y, WANG Q G, WANG C, et al. Design and analysis of sustainable lunar water resources extraction and utilization [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2023, 43 (6): 100-111 (in Chinese).
- [21] QIN X G, REN X, WANG X, et al. Modern water at low latitudes on Mars: Potential evidence from dune surfaces [J]. *Science Advances*, 2023, 9: 8868.
- [22] 吴季, 孙丽琳, 尤亮等. 2016-2030 年空间科学规划研究报告 [J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30 (6): 707-720.
- WU J, SUN L, YOU L, et al. Report on Space Science Planning Research of 2016-2030 [J]. *Proceedings of the Chinese Academy of Sciences*. 2015, 30 (6): 707-720. (in Chinese).
- [23] SCHALER E, et al. SWIM: Autonomous micro-swimmer swarms for extraterrestrial ocean exploration

[24]

[R], NASA NIAC Phase II Final Report, JPL, 2025.

HALL L P, ZACNY K, MUELLER R P, et al. Autonomous robotic demonstrator for deep drilling (ARD3): A NASA prototype for extraterrestrial subsurface exploration [R]. NASA Technical Report, JPL, 2023.

OLESON S R, LORENZ R D, PAUL M V. Titan submarine: exploring the depths of kraken mare [C]. AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition. Pasadena, CA, 2015.

POSTBERG F, HSU H W, KEMP F J, et al. Plume and ocean composition of Enceladus [J]. Nature Astronomy, 2023, 7 (5): 543-551.

[27]

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023-2032 [R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2023.

邹昕, 彭兢, 缪远明. 木星系科学探测研究与展望 [J]. 中国空间科学技术, 2023, 43 (6): 1-10.

作者简介:

陈晓 (1986—), 男, 博士, 研究方向为航天器总体设计, xchen509@126.com。

(编辑: 邓薇)