



太阳系边际探测任务设计与关键技术

吴伟仁, 唐玉华, 苏俊辰, 宋昱岐, 陈晓, 张天柱, 陈建岳, 韩承志, 杨忠炜

Research on the Scheme and Key Technology of Solar System Boundary Exploration Mission

WU Weiren, TANG Yuhua, SU Junchen, SONG Yuqi, CHEN Xiao, ZHANG Tianzhu, CHEN Jianyue, HAN Chengzhi, and YANG Zhongwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究

Scientific Payloads Proposal for Chinese Solar System Boundary Exploration Mission

深空探测学报(中英文). 2020, 7(6): 545-553

面向太阳系边际探测的多天体借力目标选择方法

Target Selection of Multiple Gravity-Assist Trajectories for Solar Boundary Exploration

深空探测学报(中英文). 2020, 7(6): 536-544

太阳系边际探测任务人工智能技术研究

Research on Artificial Intelligence Technology for Solar System Boundary Exploration Missions

深空探测学报(中英文). 2024, 11(6): 523-537

太阳系边际探测项目的科学问题

Scientific Objectives for the Exploration of the Boundary of Solar System

深空探测学报(中英文). 2020, 7(6): 517-524

太阳系边际的能量粒子探测

Detection of Energetic Particles in the Outer Heliosphere and its Boundaries

深空探测学报(中英文). 2020, 7(6): 567-573

火星探测飞行控制任务规划技术研究

Mission Planning Technology for Flight Control of Mars Exploration

深空探测学报(中英文). 2024, 11(5): 485-495



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

太阳系边际探测任务设计与关键技术

吴伟仁^{1,2}, 唐玉华^{1,2}, 苏俊辰¹, 宋昱岐¹, 陈晓^{1,3},
张天柱¹, 陈建岳⁴, 韩承志⁵, 杨忠炜⁶

(1. 深空探测实验室(天都实验室), 合肥 230036; 2. 国家航天局 探月与航天工程中心, 北京 100190;
3. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 4. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109;
5. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 6. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 面向太阳系边际探测任务, 围绕太阳系形成与演化、日球层物理、恒星际介质特性等多方面科学问题, 制定了太阳系边际探测任务的科学目标; 并根据任务目标, 开展需求分析, 提出太阳系边际探测任务初步方案设想, 形成了“鼻尖”“尾部”两次探测任务总体方案。其中, 两次任务均采用“长征五号”火箭发射, “鼻尖”任务飞行序列为地球-地球-木星; “尾部”任务飞行序列为地球-木星。在此基础上, 围绕任务难点, 重点阐述了探测器平台设计、空间核电源系统设计和科学载荷配置等关键内容, 形成基于1 kW级空间核电源的探测器设计方案, 可为中国太阳系边际探测工程实施提供参考。

关键词: 太阳系边际探测; 任务规划; 核电源探测器; 关键技术

中图分类号: V474.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2025)05-0453-10

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250050

引用格式: 吴伟仁, 唐玉华, 苏俊辰, 等. 太阳系边际探测任务设计与关键技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2025, 12(5): 453-462.

Reference format: WU W R, TANG Y H, SU J C, et al. Research on the scheme and key technology of solar system boundary exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2025, 12(5): 453-462.

引言

深空探测指人类对月球及以远的天体或空间环境开展的探测活动^[1]。自1957年人类进入航天时代以来, 已经发射了多颗深空探测器, 如“先驱者10/11号”(Pioneer 10/11)、“旅行者1/2号”(Voyager 1/2)以及“新视野号”(New Horizon), 在各自完成了对太阳系内不同区域的科学探测后, 飞离太阳系中心, 向太阳系边际以及更深远位置的恒星级空间飞行。

太阳系边际是指位于日球层顶和终止激波构成的日球层边缘, 距太阳约70~150 AU的区域, 如图1所示。该区域代表了太阳风与星际介质相互作用的前沿地带, 也是人类尚未系统探索的“无人区”, 具有极远、极暗、极寒的特点, 对太阳系边际进行探测具有重要的科学意义和工程挑战^[2]。科学上, 太阳系边际探测能够揭示行星际空间环境、太阳系物质起源与演化、太阳风与星际介质的相互作用机理等重大科学问题; 工程上, 能够牵引带动深远空间能源供应、通信传输和探测器长寿命设计等尖端技术的跨越式发展^[3]。

收稿日期: 2025-06-20 修回日期: 2025-08-28

基金项目: 民用航天“十四五”预研项目(D010202); 国家自然科学基金重大项目(62394355); 深空探测全国重点实验室稳定支持项目(NKDSSEL2024006)

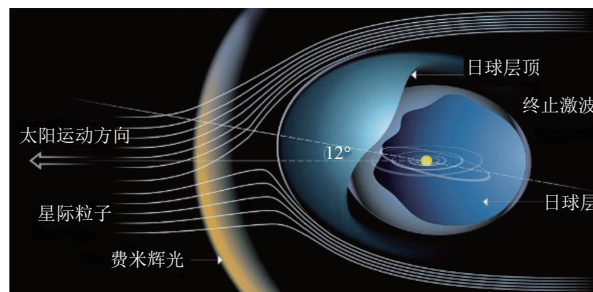


图1 太阳系边际基本概念

Fig. 1 Basic concepts of solar system boundary

人类对太阳系边际的现有认知通过就位探测和遥感探测两种方式建立。就位探测方面, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)分别于1972年3月和1973年4月发射了“先驱者10号”和“先驱者11号”, 开展第一次日球层空间探测任务, 主要致力于木星和土星的探测, 拓展任务计划开展外层空间太阳系边际探测。由于能源限制, 分别于2003年1月(约80 AU)和1995年9月(约43 AU)与地面无线电通信中断。“先驱者号”虽未曾直接穿越日球

层顶,但其传回的科学数据揭示了太阳系边界的动态性和非均匀性,为后续任务建立了基准模型^[4-7]。“旅行者1号”和“旅行者2号”分别于1977年9月、1977年8月发射,实现对木星、土星、天王星和海王星的飞跃探测,在80~95 AU附近穿越日球层终止激波,在120 AU附近穿越日球层顶后进入星际空间,截至2025年6月,“旅行者1号”和“旅行者2号”距太阳分别约165 AU和140 AU。“旅行者号”极大推动了对太阳系和星际空间相互作用的理解^[4,8-11],但由于任务设计并非针对太阳系边界探测,受限于任务末期能源供给不足、载荷配置不全(缺乏中性成分、拾起离子检测)、载荷老化精度下降、数传能力有限等问题,留下了许多悬而未决的科学问题。“新视野号”于2006年1月发射,其主要任务为首次对冥王星、冥卫一卡戎及柯伊伯带天体进行探测。截至2025年6月,“新视野号”距离太阳约60 AU,位于柯伊伯带边缘,正在以每年2.96 AU的速度向外太空飞行,预计2040年左右抵达日球层顶,由于“新视野号”未搭载磁场、宇宙线等探测载荷^[12],预计对太阳系边界探测的科学产出有限。

遥感探测方面,“星际边界探测器”(Interstellar Boundary EXplorer, IBEX)于2008年10月发射,该天文探测器位于地球-太阳拉格朗日点L1附近的轨道,旨在研究太阳系与星际空间交界区域的物理特性。IBEX绘制了太阳系边界的完整影像,并发现了一条位于太阳系边界的中性原子辐射带(Ribbon),如图2所示^[13-15]。Ribbon位于两颗“旅行者号”穿越终端激波的位置之间,“旅行者号”在穿越日球层的轨迹上并未对其进行采样。Ribbon的发现颠覆了之前的理论,对该区域来源的解释有待通过就位探测进一步深入验证。

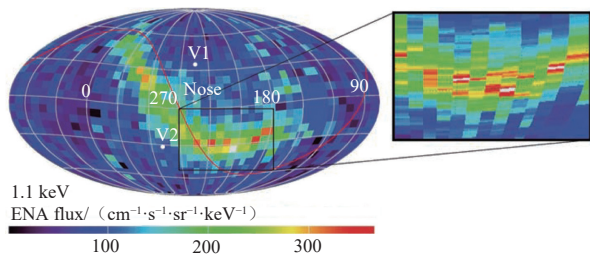


图2 IBEX观测到的中性原子彩带区

Fig. 2 Energy neutral atomic ribbon region observed by IBEX

总体而言,已有任务对太阳系边界的探测还存在以下不足:一是空间覆盖不全面,未对日球层尾部区域进行就位探测,缺乏对日球层整体结构的认知;二是关键区域缺失,“旅行者1号”和“旅行者2号”未进入中性原子彩带区,这是太阳风与星际介质相互作用的关键区域;三是载荷配置不全、数传能力有限,无法满足太阳系边界环境的探测需求。

鉴于国际任务的不足,近年来,中国启动了太阳系边界探测任务工程论证工作,对太阳系边界探测的科学背景、关键科学问题和探测科学目标进行深入分析,旨在揭示日球层物理、太阳系演化、恒星际物理等重大科学问题。论证形成了两次发射任务,即通过一颗“鼻尖”方向探测器和一颗“尾部”方向探测器实施联合探测,以实现对太阳系边界的全面就位探测。

本文基于前期论证成果,结合中国航天技术发展水平,于2030—2040年间搜索任务发射窗口,并完成任务规划和探测器方案设计,为太阳系边界探测工程实施方案提供设计思路。

1 任务目标

1.1 探测方向

太阳系边界的高价值探测区域主要有面向银河系中心的鼻尖区、背向银河系中心的尾部区以及垂直黄道面方向的极区,如图3所示。①鼻尖方向:对日球层鼻尖终止激波、日球鞘区、中性原子彩带区、日球弓激波、中性氢墙等科学目标开展探测,能够揭示日球层边界和星际空间特性、厘清太阳风动力学演化及其与星际介质相互作用机制、了解木星系统及外太阳系典型天体分布特征,理解太阳系演化规律;②尾部方向:对日球层尾部终止激波、日球尾部未知区、星际物质太阳引力聚焦锥、星际尘埃等科学目标开展探测;③极区方向:探测器垂直黄道面飞行,实现太阳高纬的就位探测及恒星际物质特性探测,开展宇宙线在日球层的全球循环机理、日球层的外部宇宙物质作用机理等研究。此外,鼻尖和尾部方向的探测中,均应在在黄道面附近飞行,使沿途可探的小行星、半人马天体、柯伊伯带天体和彗星等天体尽可能多,科学产出最大化。

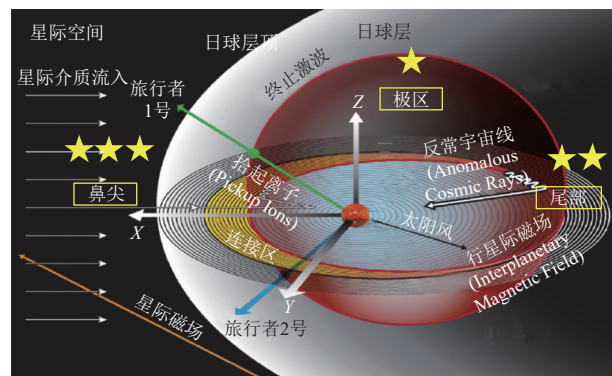


图3 太阳系边界高价值探测区域

Fig. 3 Boundary high-value exploration area of the solar system

为实现国际首次对太阳系边界的全面就位探测,综合考虑现有科学认知程度、航天技术发展水平和国

家经济能力,拟通过两次探测任务分别对日球层顶鼻尖区域和尾部区域开展就位科学探测,并对沿途飞掠的其他天体进行顺访探测。

1.2 科学目标

通过鼻尖、尾部两次任务,聚焦日球层物理和行星/天体物理学科领域,从“无人区探索”“日球层全貌”“大行星掠影”到“太阳系考古”四个层面凝练出工程总体科学目标:

1) 无人区探索:探索太阳系边际关键区域特性和星际空间特性。

首次就位探测太阳系边际的鼻尖彩带区、弓激波区、尾部四叶草区和引力聚焦锥等“无人区”;就位探测星际空间的中性氢墙、星际磁场、星际尘云等。

2) 日球层全貌:揭示日球层整体形状和结构特性、太阳风动力学演化及其与星际介质相互作用规律。

首次对不同星际条件下太阳活动高低年的日球层整体形状以及边际区波动等动态演化进行探测,就地探测尾部的终止激波、鞘区和顶部喷流的全球非均匀特性,探索太阳风暴、超热离子和湍动的传播演化和分布等特性、太阳风拾起过程以及宇宙线起源和调制。

3) 大行星掠影:探索行星系统特性和行星空间天气环境。

探索巨行星(木星)及卫星系统的大气动力学系统、物质特性和轨道修正,揭示木星及其卫星系统的行星空间天气特性(例如磁层-太阳风相互作用,卫星-磁层相互作用等)。

4) 太阳系考古:探索太阳系小天体起源和演化、观测河外背景光、搜寻第九大行星可能的区域、开展高能光子探测等空间天文实验。

探索小天体起源和演化、河外背景光特性、高能光子能谱特性及其来源,溯源引力波、暗物质和中微子等事件的高能对应体等,开展相对论等空间天文实验。

2 任务需求分析

太阳系边际探测任务与中国以往深空任务相比,面临“极远”、“极暗”、“极寒”的环境特点,因此在任务设计上提出全新的需求,包括独立的能源供电系统、极长的工作寿命、极强的环境适应性等。

2.1 轨道设计需求分析

太阳系边际探测任务对探测区域有较为严格的要求,偏离鼻尖和尾部区域会导致科学成果产出的减少。鼻尖探测任务优选区域为探测器最终位置矢量在J2000坐标系中位于经度255°、纬度0°~5°内,次选区域为侧翼方向,经度270°~300°、纬度0°~5°内;尾部

探测任务优选区域为探测器最终位置矢量在J2000坐标系中位于经度75°、纬度-5°~0°内,如图4所示。

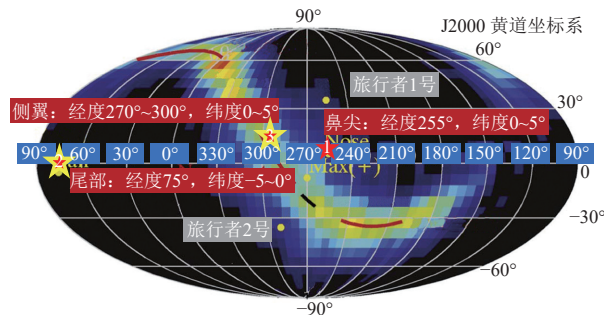


图4 J2000坐标系下探测区域分布图

Fig. 4 Distribution of detection area in J2000 coordinate system

尾部方向上可能的日心距分别约为70~75 AU和125~130 AU^[16]。

由于飞行方位固定、飞行距离极远,探测器必须具备足够高的轨道能量,需采用运载能力最强的火箭发射,并采用行星借力技术进行轨道设计。

2.2 能源需求分析

深空能源供给是制约探测器飞行距离的关键问题,太阳能电池阵-蓄电池组联合电源是目前最广泛使用的空间电源方案,但太阳系边际探测任务与以往深空探测任务不同,探测器飞行距离超过80 AU,在远离太阳的行星际飞行过程中所接收的太阳辐射能通量随其与太阳距离的平方成反比,火星表面的光照强度约为地球的43%,而木星表面的光照强度仅为地球的约4%,更远的太阳系边际能接收到的太阳辐射几乎可以忽略不计,光强的减弱使太阳能电池的光生电流随之减小,从而降低太阳能电池的输出功率。如美国“朱诺号”木星探测器太阳电池阵总面积达72.9 m²(有效电池电路面积45 m²),在轨平均供电功率只有460~490 W^[17],因此以太阳能为主的能源方案无法覆盖全任务周期内探测器能源需求,需采用空间核电源作为探测器主能源。

空间核电源主要分为放射性同位素电源(Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG)和空间核反应堆电源。放射性同位素电源的主要原料为钷-238,价格高昂,制备困难,且国内尚不具备批量制造的能力;基于铀-235裂变能的核反应堆电源,中国已经具备一定的技术基础,成为太阳系边际探测任务的首选能源方案。综合考虑中国现有技术基础与探测器功率需求,空间核反应堆电功率为1 kWe。

2.3 推进需求分析

即便采用行星借力飞行方案,太阳系边际探测器摆脱太阳系进入宇宙空间对应地球发射C3需求也远超

中国运载火箭运载能力,为提高探测器地球发射C3,探测器采用“平台舱+推进级”方案,通过推进级点火进一步提高探测器飞行速度。

由于太阳系边际探测任务核电源系统电功率较小,且电能资源宝贵,不足以支持电推进系统的应用,因此推进级采用化学推进方案。完成地球发射后,化学推进级点火,在较短时间内将探测器推离地球引力圈并飞向第一个借力天体,完成点火加速后分离推进舱。

2.4 辐射防护需求分析

探测器全生命周期内辐射防护主要考虑核电源系统和木星环境影响。核堆辐射需针对中子和 γ 射线进行防护;木星的超强磁场(比地球大20倍)俘获了超高通量和能量(比地球大2个数量级)的高能带电粒子,这些高能粒子产生的多种辐射效应(如总剂量、内部充放电、单粒子、位移损伤等)是木星借力阶段辐射防护设计的主要难点^[18]。

3 任务设计

3.1 工程大系统组成

太阳系边际探测工程大系统组成参考月球探测与火星探测工程的组织架构,分为工程总体、探测器系统、测控通信系统、地面应用系统、运载火箭系统和发射场系统^[19]。此外,由于空间核反应堆的特殊性,额外增加核电源系统,形成一个工程总体和六大系统的组织架构,如图5所示,整个任务以核电源系统和探测器系统为主线开展研制工作。



图5 太阳系边际探测任务功能模块示意图

Fig. 5 Schematic diagram of functional modules for solar system boundary exploration mission

探测器系统:尾部探测器和鼻尖探测器采用相同构型设计,能够缩短设计与研制周期,显著降低探测

器研发成本,由推进舱和平台舱串联组成,下部为推进舱,顶部为平台舱,两舱段通过连接支架联接。

核电源系统:基于中国地面核反应堆电源技术基础,研制小型空间核电源系统,保证探测器全任务周期稳定电能供应。

运载火箭系统:选用中国新一代大型运载火箭“长征五号”(CZ-5),以现有技术状态为基础,确保发射可靠性,并采取少量、可控的技术状态更改,满足核电源探测器的发射要求。

发射场系统:选择中国海南文昌航天发射场实施发射任务,在现有基础上进行适应性改进,具备核电源存储、转运、吊装和测试等条件。

测控通信系统:综合利用已有运载火箭测控网、近地航天测控网、深空测控网和VLBI测轨分系统,并进行适应性建设具备上百亿千米超远距离高精度测控和通信能力。

地面应用系统:在现有月球和深空地面应用系统基础上,进行适应性改进具备超远科学数据接收能力。

3.2 顶层任务约束

- 1) 发射日期约束:2030/1/1—2039/12/31。
- 2) 探测器寿命约束:不小于30年。
- 3) 探测器质量约束:不大于8.2 t。
- 4) 飞行距离约束:30年寿命期内飞行至日球层鼻尖/尾部边界。
- 5) 探测区域约束:探测器最终位置矢量与鼻尖方向偏离误差为 $\pm 5^\circ$,尾部方向偏离误差为 $\pm 30^\circ$ 。
- 6) 木星借力高度: $\geq 2 R_j$ (木星半径)。

3.3 任务轨道设计

3.3.1 行星借力规律

太阳系各大天体中,金星、水星和火星产生的借力效果较低,可不考虑作为借力对象。木星作为太阳系内引力常数最大的一颗行星,能够提供的速度增量也最大,因此作为本任务的首选借力天体^[20]。此外,根据探测任务需求,若需要进行内太阳系天体借力,则地球应作为首选借力天体^[21]。

3.3.2 借力窗口分析

针对太阳系边际探测需求,考虑发射窗口与飞行时间限制,列出2030—2040年木星及木星以远的太阳系各大行星与冥王星的相位关系如图6所示。受木星星历约束,尾部方向可行的木星借力时间为2032—2035年,且具备后续飞越海王星借力的可能;鼻尖方向可行的木星借力时间为2039—2041年,且具备后续飞越土星或天王星的可能。由于土星相位领先于天王星,且土

星公转角速度快, 因此飞越土星后无法再通过天王星借力, 即只能选择土星和天王星之一进行借力。

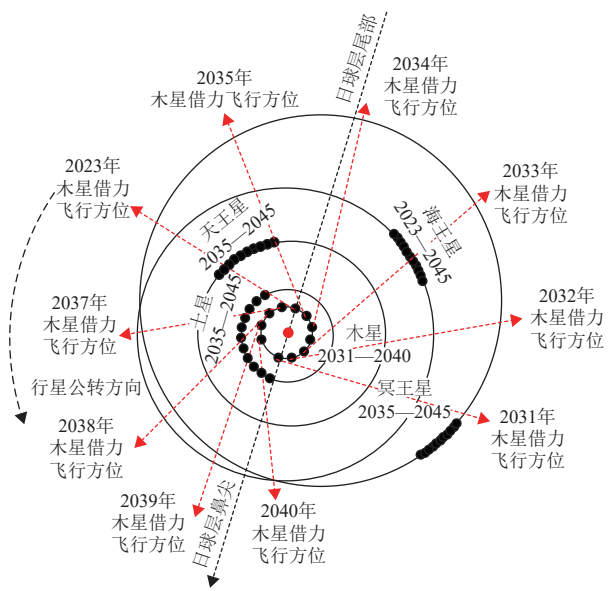


图 6 2030—2040年外太阳系行星相位总体分布图
Fig. 6 Overall distribution of planetary phases in the outer solar system from 2030 to 2040

3.3.3 发射窗口搜索

根据木星借力窗口分析结果, 在发射时间和借力时间的较优取值区间内每隔1年采样, 对于每一组采样的年份窗口组合, 分别针对不同借力序列开展转移轨迹优化, 在满足飞行距离和角度等约束的情况下使总速度增量最小。

鼻尖和尾部探测均采用附加深空机动的多天体借力转移模型, 如图7所示, 即探测器从地球出发后, 在每2个借力天体之间转移时均施加1次深空机动, 最后一次借力后轨道递推至2050年前后, 使探测器飞行距离和角度符合约束条件限制。假设总共 N 次借力, 则转移轨迹优化共需 $4(N+1)$ 个决策变量, 包括: 发射时间、 $C3$ 、纬度、经度、每次深空机动时间、每次借力时间, 借力半径、 B 平面角, 在进行窗口搜索时设定的发射 $C3$ 以“长征五号”的运载能力作为上限。

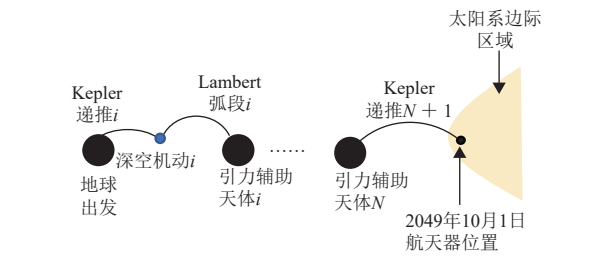


图 7 附加深空机动的太阳系边际探测多天体借力转移模型
Fig. 7 The multi-body gravity-assist transfer model for solar system boundary exploration with additional deep-space maneuvers

1) 尾部探测

针对尾部探测任务, 考虑2032—2035年木星借力窗口, 对比分析了EJ、EEJ、EJN、EEJN (E为地球, J为木星, N为海王星) 等飞行序列, 给出尾部探测优选飞行方案, 如表1所示。

表 1 尾部任务轨道优化结果

Table 1 Results of orbit optimization for tail mission		
参数	主窗口	备份窗口
飞行序列	EJ	EJ
发射时间	2032.04	2035.05
逃逸实际 $C3/(\text{km}^2\cdot\text{s}^{-2})$	103	104
总速度增量/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	0	0
到达尾部时间	2059.10	2061.04
与尾部方向夹角/ $(^\circ)$	11.8	22.9

2) 鼻尖探测

针对鼻尖探测任务, 考虑2036—2040年木星借力窗口, 对比分析了EJ、EEJ、EJ-S/U、EEJ-S/U (S为土星, U为天王星) 等飞行序列, 给出鼻尖探测优选飞行方案, 如表2所示。

表 2 鼻尖任务轨道优化结果

Table 2 Results of orbit optimization for nose mission			
参数	主窗口	备份窗口1	备份窗口2
飞行序列	EEJ	EEJ	EEJ
发射时间	2033.10	2034.11	2035.11
逃逸实际 $C3/(\text{km}^2\cdot\text{s}^{-2})$	80	66	46
总速度增量/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	0.66	1.23	2.14
到达鼻尖时间	2053.10	2053.10	2053.10
与鼻尖方向夹角/ $(^\circ)$	1.1	2.3	3.2

其中, 总速度增量全部由探测器推进舱提供。

4 核电源及探测器系统

4.1 核电源系统设计

适用于深远空间的核电源堆类型按冷却方式分为液态碱金属冷却堆、热管冷却堆和惰性气体冷却堆^[22]。根据太阳系边际探测任务的飞行规划, 空间堆的寿命应不低于30年, 热管堆由于具有无需外力驱动、冷却工质不怕冻结等特点, 在可靠性方面具有优势, 是年工作寿命设计要求的首选, 且多根热管布置提高了系统的可靠性。

反应堆采用快中子能谱, 可省略中子慢化系统, 大幅缩小体积和减轻重量, 切实提升电源系统的比功率, 可有效满足航天任务设计要求。

燃料选择方面, UO_2 、UN、UC等陶瓷型燃料由于铀密度较低, 考虑系统规模, 上述材料不适用于本任务; 纯金属铀密度最高, 但抗辐照性能差、极端高温条件下容易发生相变; UZr 、 UV 、 UNb 、 UMo 等合金

能够显著提升铀燃料的抗辐照能力和热稳定性,其中UMo合金同时具备抗辐照能力强、热稳定性好等优点,成为本任务热管堆燃料的优选方案。

热管选择方面,常用热管工质主要有K、Na和Li,评判工质的热物理性能的主要指标为液相传热系数。Li的液相传热系数最高,但Li在高温条件下产生的腐蚀性和辐照产氢行为限制了其应用。Na的综合热物性仅次于Li,高于K,因此热管堆采用Na作为热管工质。

热电转换方式上,目前国际上实现30年以上工作寿命的发电方式只有温差热电转换方式(如“旅行者1号/2号”)。热离子、碱金属、斯特林等热电转换方式,由于机理、工作环境和材料性能等原因尚不能实现30年以上的工作寿命。由于热管堆质量大,对运载能力要求高,因此实现高热电转换效率和低衰减率是热电转换单元设计的重要指标。热电转换材料一般按照工作温度分为中温区($300\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$)材料 and 高温区($600\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$)材料,更高的工作温度带来了更高的热电转换效率,因此空间堆采用高温区热电转换材料,能够有效减小空间堆质量和体积。高温区材料中,长期以来,美国空间RTG用电材料均为SiGe基合金,“旅行者1号”采用了基于该材料的MHW-RTG,至今服役寿命已经超过47年,创造了空间RTG的最高记录。中国传统SiGe基合金的热电性能已经与美国JPL相当,高温区热电材料半赫斯勒合金材料热电转换效率更高,实现了批量稳定制备,且材料制备成本也显著低于SiGe体系,因此采用半赫斯勒合金作为热电器件材料^[23]。

综合上述分析,太阳系边际探测器核电源系统采用“热管堆+温差发电”方案,如图8所示^[24]。

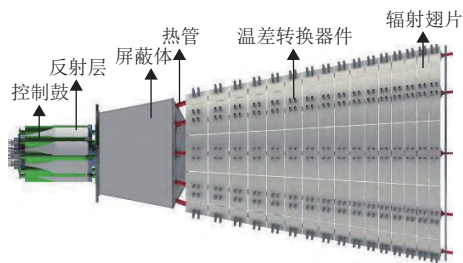


图8 “热管冷却快堆+温差发电”电源系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of power supply system of heat pipe cooled fast reactor + thermoelectric generation

4.2 探测器系统设计

探测器平台主要包括结构、机构、电源、测控数传、综合电子、GNC、推进、热控、有效载荷等分系统。探测器平台设计重点考虑对热管堆的辐射防护和

热防护,热管堆带来的辐射不仅射线种类有别与以往航天器面临的环境,而且射线能谱宽、强度大,仅依靠材料屏蔽将会给探测器带来沉重的辐射防护屏蔽负担,甚至会给探测器带来超重风险。美苏发射的核动力航天器,均将核电源放置在舱外,并伸出数米甚至数10 m的距离。本任务探测器借鉴这一设计经验,通过连接机构,使核堆远离探测器平台舱。由于CZ-5运载火箭整流罩空间有限,同时考虑到核堆在探测器发射时尚未启堆,无辐射产生,此时核堆可以靠近探测器平台舱,因此要求连接机构具备伸展功能,即发射时收拢、在轨核堆启动前展开。探测器的发射状态与展开状态如图9所示。

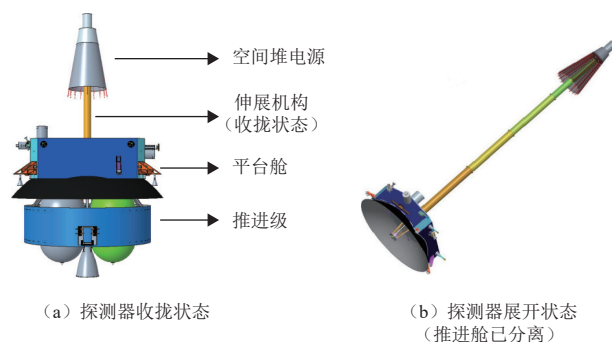


图9 探测器构型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of detector deployment status

4.3 载荷配置方案

对应太阳系边际探测科学目标的“四个层面”,“无人区探索”需要物理场探测包、粒子探测包、成像探测包和气体成分探测包配合实现;“日球层全貌”需要搭配物理场探测包和粒子探测包;“大行星掠影”主要需要成像探测包和气体成分探测包,配合物理场探测包和粒子探测包共同实现;“太阳系考古”需要空间天文探测包协同其它载荷完成^[25]。

物理场探测包包含矢量分析仪和射电分析仪;粒子探测包包含带电粒子与中性原子分析仪、尘埃分析仪;成像探测包包含长焦+广角可见光相机;气体成分探测包包含红外光谱仪、紫外光谱仪和太赫兹谱仪;空间天文探测包包含高能光子分析仪和被动氢钟。此外,为实现载荷的集成化以及运行控制,还需配置一台载荷管理器,共计11台载荷。

4.4 飞行过程

1) 尾部探测

探测器从地球出发,直接奔向木星飞行,通过木星一次借力后飞向太阳系尾部边际。表3给出了尾部探测任务中关键事件的时空节点,探测器转移轨迹如图10所示。

表 3 尾部任务关键事件时空节点
Table 3 Space-time nodes of key events for tail mission

事件	时间	状态
地球发射	2032.04.03	大椭圆停泊轨道
近地点加速	2032.04.03	$C3 = 103 \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
木星借力	2033.06.06	借力半径 $= 2.0 R_J$
2049年	2049.10.01	日心距80.5 AU
抵达尾部	2059.10.01	日心距130 AU

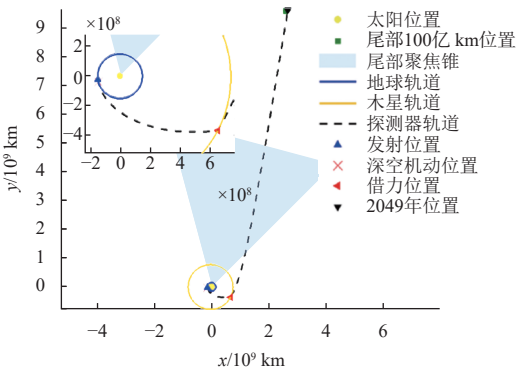


图 10 尾部任务探测器转移轨迹

Fig. 10 Transfer trajectory of tail mission detector

根据探测器的飞行过程和任务阶段，可以将尾部任务划分为四个阶段。

(1) 地球木星之间的行星际空间飞行阶段

探测器由运载火箭发射至近地点后，推进级发动点火，探测器加速逃逸，随后推进级与探测器平台分离，探测器进入地木转移轨道。此阶段内，伸展机构处于压紧状态，核堆未启堆。待探测器距地面高度大于800 km时，地面发送指令完成伸展机构展开，随后启动核堆，缓慢控制核堆内部材料的裂变速率，直至输出功率达到额定值并稳定。

在飞往木星的过程中科学载荷通电测试、检查运行状态，地球木星转移轨道沿途，对主带小行星等近地天体开展搜寻和探测；对地木行星际空间环境开展就位探测。

(2) 木星借力飞行阶段

木星借力飞行段是指探测器被木星引力捕获至再次脱离木星引力范围的时段。探测器抵达木星轨道时，探测器调整并确认飞行姿态，根据科学探测需求和产品的抗辐射特性设置探测器的加断电状态，保证穿越木星磁场和辐射带过程中探测器的安全。探测器在木星引力作用下改变飞行轨道，最终在“引力弹弓”作用下远离木星，直至脱离其引力作用范围。

木星借力期间除穿越辐射带等关键节点可能会关闭载荷外，持续对木星大气、空间环境及其卫星系统开展原位测量和各波段遥感成像，尽可能多地在飞掠过程中获取高价值科学数据。

(3) 外日球层行星际空间飞行阶段

探测器脱离木星引力作用范围后，下传飞掠期间的科学探测数据，随后在地面测控系统的支持下确定飞行方向、调整姿态，向日球层尾部方向飞行。

该阶段预期的科学目标有：逐渐增多的星际拾起离子、外日球层空间环境、湍动太阳风结构等；半人马天体、柯伊伯带天体（可一直延伸至外日鞘区甚至临近星际空间）、矮行星特性、行星际尘云、第九大行星搜寻、河外背景光等。

(4) 太阳系边际到达穿越边际阶段

该阶段探测器搭载的科学探测载荷按既定的顺序依次工作，并将数据存储记录，随后进入数传模式将数据传回地球，探测器交替重复该工作模式，直至穿越日球层寿命结束，期间逐渐延长对探测器的管控周期。

达到边际的第一个重要里程碑是日球层终止激波的穿越，包括与终止激波的粒子和电磁场前兆，以及相关射电信号等。后续将对终止激波下游的日鞘区开展长期的全面就位探测，再飞行若干年后到达星际空间。在星际空间，矢量磁力仪、波和射电、电子、离子、中性原子、尘埃等科学载荷将对其开展首次全面测量。

2) 鼻尖探测

探测器从地球出发，经过一次地球和一次木星借力后飞向太阳系鼻尖边际。表4给出了尾部探测任务中关键时间的时空节点，探测器转移轨迹如图11所示。

表 4 鼻尖任务关键事件时空节点
Table 4 Space-time nodes of key events for nose mission

事件	时间	状态
地球发射	2033.10.31	大椭圆停泊轨道
近地点加速	2033.10.31	$C3 = 80 \text{ km}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
深空机动1	2036.10.31	$\Delta V_1 = 0.44 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
地球借力	2038.10.05	借力半径 $= 1.13 R_E$
深空机动2	2038.10.30	$\Delta V_2 = 0.22 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
木星借力	2039.12.31	借力半径 $= 2.2 R_J$
2049年	2049.10.01	日心距50.4 AU
抵达鼻尖	2053.10.15	日心距70 AU

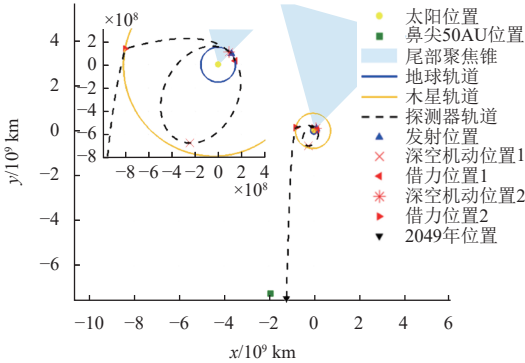


图 11 鼻尖任务探测器转移轨迹

Fig. 11 Transfer trajectory of nose mission detector

鼻尖任务飞行过程与尾部任务相似,不同的是在木星借力前,鼻尖探测器需返回地球飞掠借力,随后进入地木转移阶段。

5 关键技术

5.1 核动力探测器总体设计技术

作为国际上首颗采用热管堆作为主电源的深空探测器,热管堆与探测器的接口设计缺乏设计参考,相关的设计及验证技术是亟需解决的核心关键问题。飞行过程中探测器在各阶段环境差异大、能源需求差异大,探测器面临辐射防护、核能源管理及综合利用等关键问题。因此,亟需开展核动力探测器总体设计技术攻关,突破堆器接口设计、核能源管理及应用、智能热控与电源管理一体化设计、辐射防护设计、核动力探测器总装集成等技术,建立新型核动力探测器指标体系,优化研制流程,提出核动力探测器研制管理规范。

5.2 空间热管堆电源技术

中国核反应堆电源技术在地面已有成熟的应用,但空间热管温差堆电源的系统组成、技术特征与传统反应堆有较大差别,同时太阳系边际探测任务对热管堆电源的重量、寿命、可靠性及免维护性等提出了极高的要求,因此空间热管堆电源技术亟待攻关。空间热管堆电源是复杂系统工程,需突破空间堆电源安全标准与规范设计、全自主运行技术、结构材料寿命外推技术、温差发电器件性能衰减抑制技术、总装集成技术和综合试验验证技术等多领域、全流程关键技术,从而保障探测器长达30年的稳定能源供给。

5.3 高可靠长寿命设计技术

太阳系边际探测任务对探测器提出30年以上的寿命要求,远超目前遥感卫星12年、地球同步轨道卫星15年最长在轨寿命指标,对电子、光电产品、机电/机构、功能材料的长寿命提出严格要求。因此,亟需开展原材料、元器件的性能及失效机理、辐射屏蔽防护等研究,掌握长寿命探测器设计准则,研制有效的新型屏蔽材料。开展探测器寿命加速等效试验,通过综合极端环境模拟缩短验证周期,对各类产品的寿命指标进行等效验证。

5.4 超远距离测控通信技术

相比月球和火星探测任务,太阳系边际探测的测控通信面临更严峻的超远距离、极弱信号、超大时延场景。在更为严苛的通信条件下,为保证稳妥、可靠、高效完成测控通信任务,满足探测器高精度定

轨、遥测、遥控等需求,必须深入开展超远距离深空测控通信关键技术研究。遥控方面,地面站在采用大口径天线的基础上,需要配置更高功率的发射机;同时,为尽可能增强链路的抗干扰能力,提高信噪比和测量精度,需要配置更高频率的发射机。遥测方面,通过突破探测器大功率发射、地面超低温接收、超可靠信道编码等技术,可有效提高遥测能力,提高链路可靠性。

5.5 长期自主管理与运行技术

除了超远距离带来的超大时延问题,由于存在天体遮挡、日凌等器地通信链路中断的情况,探测器难以从地面获得长期、高精度、及时稳定的支持,因此要求探测器具备高精度自主导航和长期自主管理的能力。因此,需开展导航信息高精度获取与识别技术研究,研制新型自主导航敏感器;构建基于器上数据的自主任务规划与智能管理技术体系,通过健康状态监测、故障识别隔离及重构恢复机制,保障探测器超长周期的自主运行可靠性;利用器上计算资源对载荷探测数据进行压缩处理、特征提取及在线关联性分析,实现器上信息智能处理^[26-27]。

6 结 论

太阳系边际探测蕴含了重要的科学意义、工程价值和人文精神。面向太阳系边际探测任务的“无人区探索、日球层全貌、大行星掠影和太阳系考古”四大科学目标,设计了两次发射开展联合探测的方案,分别朝向太阳系“鼻尖”和“尾部”飞行,实现国际首次对太阳系边际的全面就位探测。两次任务均采用“长征五号”火箭发射,其中,尾部任务先行,计划于2032年4月发射,通过木星借力,2059年飞抵约130 AU处的太阳系尾部边际;鼻尖任务计划于2033年11月发射,通过地球、木星借力,2053年飞抵约70 AU的太阳系鼻尖边际。两次任务中探测器采用相同的构型设计,由探测器平台和推进级两舱段组成,总重约8.2 t,携带矢量分析仪、波和射电分析仪、带电粒子与中性原子分析仪、尘埃分析仪、可见光相机、红外光谱仪、紫外光谱仪、太赫兹谱仪、高能光子分析仪、被动氢钟和载荷管理器共11台载荷,采用1 kW级温差型空间热管堆电源为探测器提供超过30年的稳定能源供给。

参考文献

- [1] 吴伟仁,于登云.深空探测发展与未来关键技术[J].深空探测学报,2014,1(1):5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its

- future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(1): 5-17.
- [2] 吴伟仁,于登云,黄江川,等. 太阳系边际探测研究[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(1): 1-16.
- WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the solar system boundary[J]. *Scientia Sinica Information*, 2019, 49(1): 1-16.
- [3] 王赤,李晖,郭孝城,等. 太阳系边际探测项目的科学问题[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 517-524, 535.
- WANG C, LI H, GUO X C, et al. Scientific objectives for the exploration of the boundary of Solar system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 517-524, 535.
- [4] PESSES M E, JONES W V, FORMAN M. Voyager and Pioneer missions to the boundaries of the heliosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, 98(A9): 15123-15127.
- [5] PAGE D E. Expanding our knowledge of the heliosphere[J]. *Advances in Space Research*, 1995, 16(9): 5-23.
- [6] ANDERSON J D, LAING P A, LAU E L, et al. Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11[J]. *Physical Review D*, 2002, 65(8): 10-16.
- [7] ZIRNSTEIN E J, MÖBIUS E, ZHANG M, et al. In situ observations of interstellar pickup ions from 1 au to the outer heliosphere[J]. *Space Science Reviews*, 2022, 218(4): 12-16.
- [8] RICHARDSON J D. Voyager observations of the interaction of the heliosphere with the interstellar medium[J]. *Journal of Advanced Research*, 2013, 4(3): 229-233.
- [9] GURNETT D A, KURTH W S, BURLAGA L F, et al. In situ observations of interstellar plasma with Voyager 1[J]. *Science*, 2013, 341(6153): 1489-1492.
- [10] STONE E C, CUMMINGS A C, HEIKKILA B C, et al. Cosmic ray measurements from Voyager 2 as it crossed into interstellar Space[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(11): 1013-1018.
- [11] GURNETT D A, KURTH W S, STONE E C, et al. A foreshock model for interstellar shocks of solar origin: Voyager 1 and 2 Observations[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 161(1): 11-20.
- [12] FOUNTAIN G H, KUSNIERKIEWICZ D Y, HERSMAN C B, et al. The new horizons spacecraft[J]. *Space Science Review*, 2008, 140: 23-47.
- [13] MCCOMAS D J, ALLEGRIANI F, BOCHSLER P, et al. IBEX—interstellar boundary explorer[J]. *Space Science Reviews*, 2009, 146(1-4): 11-33.
- [14] MCCOMAS D J, ALLEGRIANI F, BOCHSLER P, et al. Global observations of the interstellar interaction from the Interstellar Boundary EXplorer (IBEX)[J]. *Science*, 2009, 326(5955): 959-962.
- [15] FRISCH P C, MCCOMAS D J. The Interstellar Boundary EXplorer (IBEX): tracing the interaction between the heliosphere and surrounding interstellar material with energetic neutral atoms[J]. *Space Science Reviews*, 2013(176): 101-113.
- [16] WANG C, BELCHER J W. The heliospheric boundary response to large-scale solar wind fluctuations: a gasdynamic model with pickup ions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, 104(A1): 549-556.
- [17] BOLTON S J, LUNINE J, STEVENSON D, et al. The Juno mission[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 213(1-4): 5-37.
- [18] 王颖,张焯,任德鹏,等. 太阳系边际探测任务辐射效应综合分析[J]. *宇航学报*, 2024, 45(2): 295-302.
- WANG Y, ZHANG H, REN D P, et al. Comprehensive radiation effects analysis of exploration to the boundary of the solar system[J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(2): 295-302.
- [19] 胡浩,裴照宇,李春来,等. 无人月球采样返回工程总体设计——嫦娥五号任务[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(11): 1275-1286.
- HU H, PEI Z Y, LI C L, et al. Overall design of unmanned lunar sampling and return project—Chang'e-5 mission[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2021, 51(11): 1275-1286.
- [20] 田百义,王大轶,张相宇,等. 太阳系边际探测飞行任务规划[J]. *宇航学报*, 2021, 42(3): 284-294.
- TIAN B Y, WANG D Y, ZHANG X Y, et al. Flight mission planning for solar system boundary exploration[J]. *Journal of a Stronautics*, 2021, 42(3): 284-294.
- [21] 于国斌,汪鹏飞,朱安文,等. 基于10 kWe核反应堆电源的海王星探测任务研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(6): 711-721.
- YU G B, WANG P F, ZHU A W, et al. Mission analysis of a Neptune detector with a 10 kWe nuclear reactor power generator[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2021, 51(6): 711-721.
- [22] 吴伟仁,刘继忠,赵小津,等. 空间核反应堆电源研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(1): 1-12.
- WU W R, LIU J Z, ZHAO X J, et al. System engineering research and application foreground of space nuclear reactor power generators[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2019, 49(1): 1-12.
- [23] 徐庆,赵琨鹏,魏天然,等. 热电材料的研究现状与未来展望[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(7): 1296-1305.
- XU Q, ZHAO K P, WEI T R, et al. Development and prospects of thermoelectric materials[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(7): 1296-1305.
- [24] 安伟健,胡古,郭键,等. 深空轻质长寿热管堆电源方案研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2024, 11(5): 453-461.
- AN W J, HU G, GUO J, et al. Study of a deep-space light-mass long-life heatpipe reactor power scheme[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, 11(5): 453-461.
- [25] 张爱兵,李晖,孔令高,等. 太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 545-553.
- ZHANG A B, LI H, KONG L G, et al. Scientific payloads proposal for Chinese solar system boundary exploration mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 545-553.
- [26] 徐瑞,李世震,李朝玉,等. 太阳系边际探测器自主技术需求分析[J]. *宇航学报*, 2024, 45(5): 647-660.
- XU R, LI S Z, LI Z Y, et al. Demand analysis on autonomous technology for probes to the boundary of the Solar system[J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(5): 647-660.
- [27] 张哲,唐玉华,郑祚修,等. 太阳系边际探测任务人工智能技术研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2024, 11(6): 523-537.
- ZHANG Z, TANG Y H, ZHENG Z X, et al. Research on Artificial intelligence technology for solar system boundary exploration missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, 11(6): 523-537.
- 作者简介:
吴伟仁(1953—),男,中国工程院院士,研究员,博士生导师,主要研究方向:航天测控通信与系统总体设计。
通信地址:北京市海淀区东冉北街9号(100190)

Research on the Scheme and Key Technology of Solar System Boundary Exploration Mission

WU Weiren^{1,2}, TANG Yuhua^{1,2}, SU Junchen¹, SONG Yuqi¹, CHEN Xiao^{1,3},
ZHANG Tianzhu¹, CHEN Jianyue⁴, HAN Chengzhi⁵, YANG Zhongwei⁶

(1. Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230036, China;

2. National Space Administration Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, Beijing 100190, China;

3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

4. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

5. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

6. National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, targeting the solar system boundary exploration mission, the scientific objectives of the mission were formulated by addressing multiple scientific issues such as the formation and evolution of the solar system, heliospheric physics, and interstellar medium properties. Based on these objectives, a requirement analysis was conducted, a preliminary mission concept was proposed, and an overall plan for two exploration missions—the “Nose” (nose-first approach) and “Tail” (trailing approach) missions—was developed. Both missions will be launched using the Long March 5 rocket, with the “Nose” mission following a flight sequence of Earth-Earth-Jupiter and the “Tail” mission following Earth-Jupiter. Based on this framework, focusing on mission challenges, key technical aspects—including detector platform design, nuclear power system design, and scientific payload configuration—were elaborated and a detector design scheme based on a 1 kWe-class space reactor power source was proposed. This study can provide reference for the implementation of China’s solar system boundary exploration projects.

Keywords: interstellar boundary exploration; mission planning; nuclear-powered detector; key technology

Highlights:

- Analyzed the scientific objectives of the solar system boundary exploration mission and determined to achieve comprehensive in-situ detection of the solar system boundary through two missions: “Nose” (nose-first approach) and “Tail” (trailing approach).
- Conducted mission requirement analysis, completed trajectory design, and developed overall mission planning.
- Proposed an overall design for a nuclear-powered detector based on a 1 kWe-class space heat pipe reactor power source.
- Analyzed key technologies urgently requiring breakthroughs for solar system boundary exploration.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]