

太阳抵近探测计划

——观测位置的新突破

林隽^{1,2,3,4}, 陆希⁵, 陈雨豪^{1,3,4}, 黄帆⁵, 张坤毅⁶, 张艺腾⁶, 周斌⁶, 葛振华⁷, 刘鏊⁸,
田晖⁹, 何建森⁹, 程鑫¹⁰, 陈鹏飞¹⁰, 白先勇¹¹, 季海生¹², 刘佳佳¹³, 张晓世¹⁴

(1. 中国科学院云南天文台, 云南昆明 650216; 2. 中国科学院天文大科学研究中心, 北京 100012; 3. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049; 4. 云南省太阳物理与空间目标监测重点实验室, 云南昆明 650216; 5. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 6. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 7. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南昆明 650031; 8. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203; 9. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 10. 南京大学天文与空间科学学院, 江苏南京 210093; 11. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 12. 中国科学院紫金山天文台, 江苏南京 210023; 13. 中国科技大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026; 14. 云南大学物理天文学院, 云南昆明 650500)

摘要: 太阳抵近探测计划(SCOPE)旨在突破高温和强辐射防护、长距离运载、远距离轨道控制和先进载荷等一系列极限技术,将探测器投送至距太阳中心仅有5个太阳半径的位置上,深入太阳大气层进行探测,研究太阳附近极亮、极热的深空探测“无人区”,在全新的位置上对太阳进行超近距离原位探测和遥感观测,针对磁场和等离子体结构实现空间分辨率优于0.1"的观测。探测器将穿越太阳爆发磁重联电流片,显微观测太阳爆发磁结构,原位探测磁重联电流片、日冕物质抛射与激波以及各类带电粒子,以推动揭示太阳爆发理论机理。探测器将在最靠近太阳的区域显微监测和探测日冕中尺度小于0.1"的纳耀斑、光球中尺度小于0.06"的磁场和速度场结构及其演化特征,确认日冕加热机制;探测太阳风重离子电荷态,确认太阳起源及加速机制。探测器还将在最接近太阳的区域与原位探测日冕磁场,显微观测太阳极区磁场和等离子体结构和演化特征;揭示太阳附近尘埃分布特征,进入无尘埃区,确定太阳系尘埃盘内边界。困扰太阳物理界近百年的两个科学难题,即太阳爆发机理难题和日冕加热与太阳风加速机理难题,随着该计划的顺利实施将被破解;在最接近日心的位置处实现日冕磁场,包括太阳极区磁场原位探测“0到1"的突破也将实现。本文将介绍SCOPE的背景、科学目标和预期产出、有效载荷以及卫星平台关键技术。

关键词: 太阳爆发; 磁场; 磁重联; 中高能粒子; 原位探测; 热防护; 深空通信

中图分类号: P 182; P 354; V 524 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.05.001

引用格式: 林隽, 陆希, 陈雨豪, 等. 太阳抵近探测计划——观测位置的新突破[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(5):1-10.

Solar Close Observations and Proximity Experiments: A Breakthrough in the Observation Position

LIN Jun^{1,2,3,4}, LU Xi⁵, CHEN Yuhao^{1,3,4}, HUANG Fan⁵, ZHANG Shenyi⁶, ZHANG Yiteng⁶,
ZHOU Bin⁶, GE Zhenhua⁷, LIU Liu⁸, TIAN Hui⁹, HE Jiansen⁹, CHENG Xin¹⁰,
CHEN Pengfei¹⁰, BAI Xianyong¹¹, JI Haisheng¹², LIU Jiajia¹³, ZHANG Xiaoshi¹⁴

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, Yunnan, China; 2. Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Yunnan Key Laboratory of Solar Physics and Space Science, Kunming 650216, Yunnan, China; 5. Shanghai Institute of Satellite Engineering,

收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2024-08-28

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0503804); 国家自然科学基金(11933009); 云南省林隽科学家工作室(太阳物理研究)资助项目

作者简介: 林隽(1964—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为太阳物理、太阳爆发理论及模型、大尺度湍流磁重联。

Shanghai 201109, China; 6.National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 7.School of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, Yunnan, China; 8.Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China; 9.School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 10.School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 11.National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 12.Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 13.School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Anhui 230026, Hefei, China; 14.School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract: The Solar Close Observations and Proximity Experiments (SCOPE) is a space mission for solar observations. It aims to send a spacecraft into the solar atmosphere deeply, approaching to the Sun at a location around 5 solar radii from the center of the Sun, so as to explore the super-bright and super-hot “uninhibited zones” of the deep space near the Sun. A set of breakthroughs are expected to make by the mission in the limits to techniques such as high temperature and strong radiation protection, super-long distance delivery, orbit control at large distance, and advanced payloads. The observations and in-situ measurements of the Sun will be performed at a brand new position on the magnetic field and plasma structures with the special resolution better than 0.1". The spacecraft will traverse the magnetic reconnection current sheets, coronal mass ejections, associated fast mode shocks, and various charged particles occurring in the solar eruption for revealing the theoretical mechanisms of the solar eruption. The instruments will microscopically observe and in-situ measure the nano-flares smaller than 0.1" in the corona and the magnetic field and plasma structures smaller than 0.06" in the photosphere at an unprecedentedly close distance, identifying the features and associated mechanisms for corona heating. The detection of the charge states of heavy ions in the solar wind will help identify the origin and acceleration mechanisms of the solar wind. The coronal magnetic field and plasma, including those in the polar region, will be directly detected at the closest distance to the Sun, and the associated structures will be microscopically observed. The dust distribution of the dust around the Sun will be revealed, and the inner edge of the dust disk in the solar system will be explored. Two fundamental puzzles, i. e., solar eruption and corona heating, which have challenged the solar physics community for about a century, will be solved with the success of the mission; and a breakthrough will also be realized in detecting the coronal magnetic field, including that in the polar region. In this paper, the background, science, expected scientific achievements, payloads, and key satellite platform techniques of the SCOPE are introduced.

Key words: solar eruption; magnetic field; magnetic reconnection; medium and high energy particles; in-situ measurement; thermal protection and isolation; telecommunications in deep space

0 引言

太阳是地球生命赖以存在的能量之源,也造就了人类的生存环境,对生命的存在具有显著价值和意义;太阳活动会对人类生存环境产生不同程度的干扰或影响。研究太阳和太阳活动,也是在研究人类自己的家园。太阳活动主要表现为太阳黑子、日珥、光斑、谱斑、耀斑、爆发日珥和日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME),与磁场关系密切。

以太阳耀斑、爆发日珥和日冕物质抛射为代表的太阳剧烈活动(或太阳爆发)将巨大的磁场能量(10^{32} 尔格,超过我国 2023 年发电总量的 30 万倍)在很短时间(几十分钟)内释放出来,对行星际空间造成剧烈扰动,将严重影响地球及其周围空间环境

(即空间天气),造成灾害性空间天气事件,直接干扰人类宜居环境,威胁国家空天安全、信息安全、能源安全。因此,研究太阳活动和爆发的基本物理性质与磁场的内在联系,探索其物理规律,提高空间天气预报水平,规避灾害性空间天气对国家安全的负面影响,是大国必争的战略要地和博弈焦点,也是研究和了解其他恒星与宜居世界关系的重要窗口^[1]。

地球大气为人类家园提供了重要保护,但也对天文学研究,包括对太阳的研究,构成重大的阻碍。为避开这层阻碍,人类开始尝试在太空中进行观测。1960 年 3 月 11 日,美国发射了人类历史上第一颗能够观测太阳的人造卫星。截至 2022 年,全球共发射了 70 余颗这样的人造卫星,包括我国的“风云二号”(FY-2)、

“风云三号”(FY-3)、“羲和号”(CHASE)^[2-3]、“夸父一号”(ASO-S)^[4]4 颗卫星,以及中国科学院空间新技术实验卫星^[5]。21 世纪以来,太阳物理许多开拓性的重大成就都与空间观测密不可分。

从轨道部署来看,这些探测器基本上都在黄道面和地球轨道附近或者更远的轨道上运行,缺乏对太阳爆发原位探测的功能。美国于 2018 年发射的帕克太阳探针(Parker Solar Probe, PSP)是太阳物理空间探测的先驱者^[6],可以飞行至距离日心 9.86 个太阳半径(R_{\odot})的位置上对太阳进行近距离原位探测,意义重大,且已经取得丰硕的成果^[7-12]。但是它的轨道倾角只有 3.4° ,无法探测日心距小于 $9.86R_{\odot}$ 或者高纬度区域内的目标。

对于太阳活动和爆发而言,日心距为 $10R_{\odot}$ 的位置是一个重要的分水岭。研究表明,CME 动力学特征最明显的阶段^[13-15]、带电粒子被 CME 激波捕获后加速^[16]、太阳风重离子电荷态开始冻结^[17-20]、太阳系尘埃盘内边界^[8]、太阳风磁场弯折起源^[7]、太阳风获得明显加速^[21-22],均发生或存在于日心距 $<10R_{\odot}$ 的范围内。

太阳活动几乎遍布整个纬度范围,现有的观测方式,包括 PSP 和太阳轨道飞行器(Solar Orbiter)^[23]在内,只能获得低纬度区域内的数据,对全面揭示太阳活动物理本质的目标而言,缺失了很大一部分关键信息。我国目前正在推动的“太阳极轨天文台(Solar Polar Observatory, SPO)”任务将采用高轨(轨道倾角 $> 80^{\circ}$)

运行模式,在 1 AU 的距离上以遥感方式观测太阳极区^[24]。

本文将介绍一个雄心勃勃的太阳深空探测任务,太阳抵近探测计划(Solar Close Observations and Proximity Experiments, SCOPE)。该任务将把探测器送到近(远)日点为 $5R_{\odot}$ ($123R_{\oplus}$)、倾角 $>50^{\circ}$ 的轨道上,在国内外其他空间任务没有涉足的全新位置上探测和观测太阳,获取前所未有的高分辨率、高精度观测资料,破解困扰太阳物理学家近百年的难题。本文将阐述 SCOPE 的科学目标,介绍为实现这些科学目标所设计的科学轨道和配备的有效载荷,介绍相应的卫星平台技术,最后对本工作进行总结。

1 科学目标

SCOPE 的科学目标可概括为破解“太阳爆发机理”和“日冕加热机理”两大理论难题,实现“日冕矢量磁场与极区磁场精细结构”信息获取零的突破。这涉及太阳爆发的产生与能量快速释放的本质,日冕温度反常增高的关键要素探测和物理机制,以及对日冕磁场进行常规探测的普适方法。在缺乏近距离观测或原位探测资料的情况下,上述问题难以解决,相应突破难以实现。上述科学目标、研究思路、探测要素和实现这些科学目标所需有效载荷及其所承担的任务归纳见表 1。有效载荷将在下一节详细介绍。

表 1 科学目标、研究思路、探测要素、各载荷所承担任务

Tab.1 Scientific goals, roadmaps of research, key targets, and task of each payload

科学目标	研究思路	探测要素	承担任务的有效载荷
破解太阳爆发理论机理难题	以 Lin-Forbes 模型 ^[13] 为指引,通过近距离观测或原位探测爆发磁结构,获取磁重联电流片几何尺度 ^[25] ,探测电流片、CME 和激波的精细结构 ^[26-28] ,探测高能粒子,全面证实由 Lin-Forbes 模型所刻画太阳爆发的全物理过程 ^[29-34]	爆发磁结构	多波段光谱成像仪
		各类高能带电粒子(电子能量达到 10 MeV 以上,质子和重离子能量分别达到 300 MeV 和 300 MeV/n) ^[35-37]	中高能粒子探测器
		磁重联电流片与激波 ^[38-39]	电磁场探测仪
破解日冕加热和太阳风加速之谜	参考已有日冕加热候选机制 ^[40-41] ,通过近距离观测和原位探测,提供日冕加热具体机制的观测实证 ^[43-45] ;针对太阳风源区的湍流性质及其与离子电荷态冻结过程的关系,通过探测源区湍流结构和跟踪重离子电荷态冻结过程,揭示两种太阳风的起源与加速机制 ^[48] ;完整描述日冕加热和太阳风加速的物理图像	纳尺度($<0.1''$)结构及演化特征 ^[42] ,太阳风源区湍流结构	多波段光谱成像仪、电磁场探测仪
		给定日冕加热机制的观测表现 ^[46-47]	多波段光谱成像仪
		太阳风重离子电荷态冻结过程	中高能粒子探测器
实现关键物理信息获取零的突破	在黄道面之外 ^[24] ,对不同纬度的日冕矢量磁场直接进行原位探测,解决普适的常规测量日冕磁场的方法和技术缺乏的问题 ^[49-55] ,对磁场和等离子体结构进行超近距离遥感观测;根据尘埃与飞船碰撞的后果 ^[56] 研究近日环境尘埃分布,确定太阳系尘埃盘内边界;结束中低层日冕矢量磁场、极区磁场与等离子体动力学性质以及太阳附近尘埃分布等重要信息缺失的历史	日冕矢量磁场	电磁场探测仪
		日冕与极区磁场和等离子体结构	多波段光谱成像仪、电磁场探测仪
		太阳附近尘埃及其分布特征	电磁场探测仪

2 科学轨道与有效载荷

2.1 科学轨道设计

CHEN 等^[57]发现 CME 在日面上的源区分散在很大的纬度范围内,尾随 CME 的大尺度电流片的方位也有随机分布的特点。因此,PSP 虽然能够穿越并探测到发生在赤道附近的 CME 和电流片^[12],然而会错过发生在高纬度的爆发。CHEN 等的计算表明,PSP 在太阳峰年每年有 1.5 次机会大角度穿过电流片;如果将探测器的轨道倾角抬高到 65° 左右,并将轨道近日点和远日点分别设置在 $5R_\odot$ 和 $123R_\odot$,探测器在太阳峰年每年有 4.5 次机会穿过电流片。另外,这样的轨道还可以很好地覆盖另外两个科学目标,完成其他空间计划难以完成的任务。

实现上述科学轨道可参考“Juno”号轨道的实现方式。计算发现,可使用长征五号加上面级将飞船先送入地球借力轨道;采用地球 2:1 共振借力向木星转移,通过木星借力,将轨道倾角抬高到 64.9° 并将轨道近日点调到日心距 $5R_\odot$ 附近;使用电推进系统^[58],在近日点附近反向点火,在降低远日点的同时进一步降低近日点,最终达到科学轨道,如图 1 所示。这一方法的优势在于可以很容易将轨道抬高,近日点也可以非常靠近太阳 ($<5R_\odot$);不足之处在于探测器到达第一个近日点的时间在发射后的 5 年左右,而且工程难度也较大。

也可借鉴 Solar Orbiter 的方法,利用多次金星

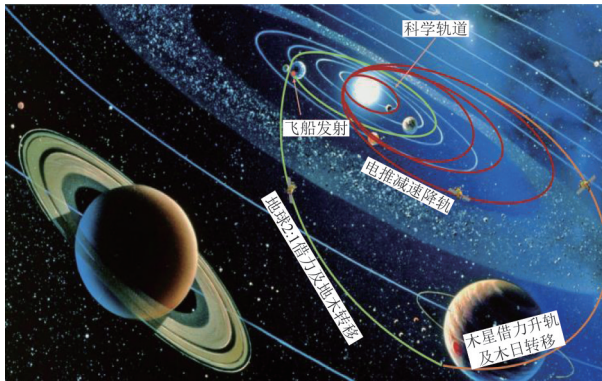


图 1 太阳抵近探测飞船发射后经地球-木星借力变轨、入轨过程以及最终的科学轨道

Fig.1 The trajectories of the SCOPE spacecraft after launch, including the orbit drift via Earth and Jupiter gravity assists, the orbital entrance process, and the final drift into its scientific orbit

借力抬高 SCOPE 的轨道倾角并同时降低近日点和远日点的高度,最终达到抵近探测太阳的目的,如图 2 所示。这一方法的优势在于可以很快(发射之后半年内)接近太阳、开展抵近探测;不足之处则在于轨道倾角很难抬高,而且比 PSP 更接近太阳,与实现高轨两个目标难以兼顾。

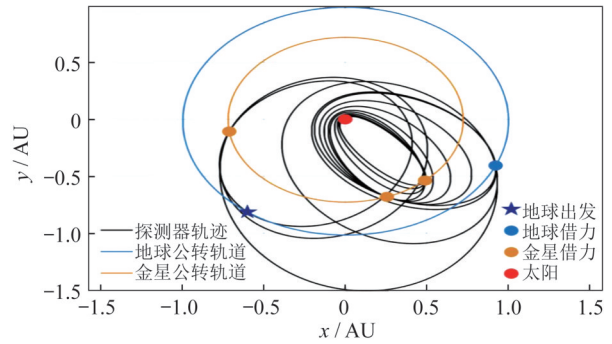


图 2 太阳抵近探测飞船发射后经地球-金星借力轨道转移(xy-平面)

Fig.2 The orbital drift of the launched SCOPE spacecraft via Earth and Venus gravity assists (in the xy -plane)

综合分析两个方案的特点后注意到,它们都能够让探测器深入太阳大气,实现对太阳的抵近探测。同时,根据 CHEN 等^[57]的计算结果,在大倾角轨道上,探测器的可探测区间能覆盖更大的纬度范围,并且可以大角度穿越 CME-耀斑磁重联,更有利于科学目标的实现。

2.2 有效科学载荷

针对前述科学目标,SCOPE 装备的有效科学载荷包括电磁场探测仪、中高能粒子探测仪、多波段光谱成像仪。

它们各自针对的科学目标如图 3 所示,相应任务已在表 1 中列出,下面是对它们略为详细的介绍。

2.2.1 电磁场探测仪

探测太阳大气中的电磁场,具备超大动态测量能力和高频同步采集能力。其相应指标见表 2。除了对电磁场的直接探测,电磁场探测仪还可以间接探测飞船周围的尘埃。SZALAY 等^[56]的研究表明,尘埃对飞行平台的撞击会对电场仪的探测结果产生 1 V 左右的扰动(对磁场仪探测结果无影响),但是持续时间很短(~ 1 ms),属于偶发事件,很容易与其他信号区分开来。可以通过辨认该信号间接地探测行星际尘埃。

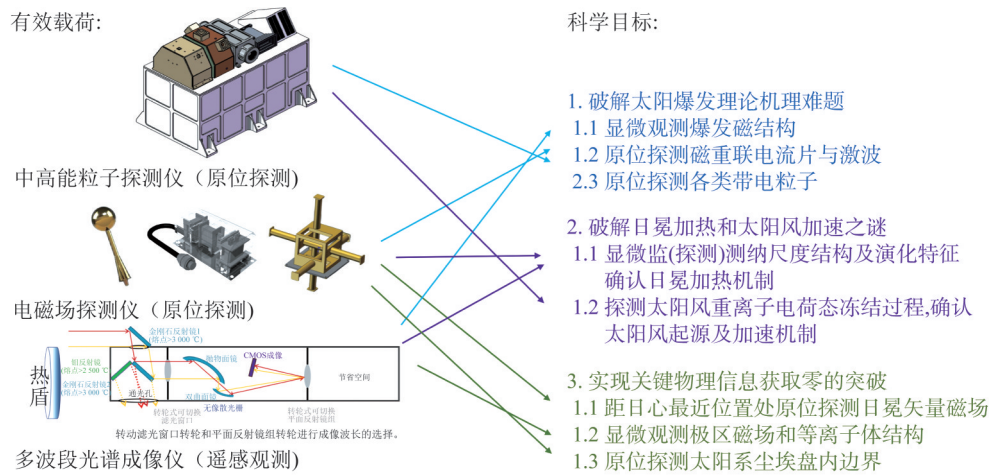


图 3 SCOPE 的有效载荷及其所针对的科学目标

Fig.3 Payloads of the SCOPE and their scientific goals

表 2 电磁场探测仪功能与指标

Tab.2 Functions and indicators of the electromagnetic field detector

探测要素	测量动态范围		响应带宽	噪声水平
电场	±1 V/m		DC~1 MHz	平均 0.2 mV/(m·Hz ^{-1/2}) @1 Hz~1 MHz
磁场	地面测试及木星借力模式/nT	± 65 536	DC~20 kHz	≤3×10 ⁻² nT/Hz ^{1/2} @1 Hz ≤1×10 ⁻² nT/Hz ^{1/2} @1 kHz
	近日模式(<10R _☉)/nT	± 16 384		
	远日模式(>10R _☉)/nT	± 4 096		
	行星际模式(>20R _☉)/nT	± 1 024		

2.2.2 中高能粒子探测仪

探测太阳活动产生的中高能粒子(包括太阳风粒子);为适应抵近观测粒子辐射特性,需要实现通量和能量的跨越 6 个量级的超大动态范围测量,分为 3 个能段:电子能量 0.1 keV~30 MeV;质子能量 30 keV~300 MeV;重离子能量 0.1 keV/n~300 MeV/n。另外,太阳风离子电荷态分辨率 ΔQ<1。

2.2.3 多波段光谱成像仪

对重要目标进行成像观测,有效口径 62 mm,工作波段:90~310、6 563 和 5 300 Å,在这些波段直接观测从光球到日冕不同大气层中各种尺度的太阳活动。在可见光波段,该成像仪的分辨率在近日点附近相当于地面上 2.6 m 望远镜的分辨率;在极紫外波段,可分辨尺度在 30 km 以上的目标。极紫外光学原件的加工非常困难,不能保证达到衍射极限的水平,只能对照 SDO/AIA 和 SO/EUI 的参数和性能进行估计。

为突出 SCOPE 的特色,将它的有关指标、功能和预期探测结果与 PSP 的相应内容做对比,结果见表 3。

探测器飞行过程中,将根据科学目标的设置,3 类载荷择时开机,实现对日冕的就位探测及爆发活动的近距离成像探测,其他时段粒子探测仪和电磁场探测仪持续开机,开展行星际空间就位探测。

3 卫星平台关键技术

目前,SCOPE 项目组对卫星平台关键技术的研究聚焦于如下几个方面:热防护系统、自主管理系统以及星地通信系统。在近日点附近,飞船会面临 2 600 °C 温度的炙烤和超过地球附近 1 600 倍的太阳风粒子的持续轰击,因此,决定 SCOPE 项目成败的一个关键因素是飞行平台的热防护和抗辐射性能。另外,如果采用木星借力的变轨方案,还需要解决远距离的通信难题。下面将介绍为应对飞行过程中的这些问题,卫星平台的关键技术和相应的设计方案。

3.1 热防护系统

本系统包括 3 个部分:耐高温热盾与稀土钽酸盐抗辐射涂料,半导体热电温差供电系统,以及先进自适应温控系统。

表 3 SCOPE 与 PSP 的各项指标和性能对比

Tab.3 Comparisons of the indicators and functions between the SCOPE and PSP

比较项目		PSP(美国)	SCOPE(中国)
轨道	倾角	3.4°黄道面附近	64.9°远离黄道面
	近日点/远日点日心距(R_{\odot})	9.86/150	5/123
	周期/d	88	59.3
载荷特色	光学载荷	侧面观测	直接观测
	太阳风粒子探测仪	无电荷态探测	有电荷态探测
	中高能粒子探测仪	有	有
	电磁场探测仪	有	有
科学预期	峰年穿越 CME-耀斑电流片机会	1.5 次/年	4.5 次/年
	近距离($<25R_{\odot}$)观测 CMER 耀斑电流片	每轨 79.5 h 观测窗口,白光	每轨 73 h 观测窗口,多波段
	搜寻及证认纳耀斑(<70 km)加热日冕证据	无	每轨 48 h 观测窗口
	搜寻与证认纳尺度(<40 km)波动源以及 MHD 波加热日冕证据	无	每轨 24 h 观测窗口
	日冕矢量磁场就位测量范围	$>9.86R_{\odot}$,黄道面附近	$>R_{\odot}$,大纬度范围
	高能带电粒子 CME 激波加速注入区间($5R_{\odot}\sim 10R_{\odot}$)就位测量	无	每轨 24 h 观测窗口
	太阳风源区就位探测	黄道面附近	近乎全纬度范围
	太阳极区近距离($<6R_{\odot}$)观测	无	每轨 2 次机会
	重离子电荷态冻结过程就位探测	无	每轨 24 h 探测窗口
	太阳风磁力线回转源区就位探测	无	每轨 24 h 探测窗口
进入无尘埃区就位探测其内边缘	无	每轨 24 h 探测窗口	

3.1.1 耐高温热盾

对比 PSP 探测器的热盾性能指标,SCOPE 的热防护盾,在高温热防护、机械性能等方面极具优势,它能提升抗高温能力,降低迎日面吸收率和热发射率比值,提高陶瓷涂层韧性。SCOPE 在近日点附近辐射温度高达 2 600 °C(PSP 面临的最高温度为 1 400 °C),对热盾的抗辐射和耐高温性能提出了严格的要求。同时,在寸土寸金的航天载具上,严格控制性能与载重的关系也是不可缺少的。碳泡沫具有低密度、高强度、低热导率、抗高温、耐腐蚀等特点,是最为常见的轻质隔热材料,但其多孔结构,难以抵挡住太阳风侵蚀,因此,采用碳/碳(C/C)复合材料将其包裹起来,构成热盾的主体,具有质量轻、真空隔热性能超强等特点。与此同时,在热盾向阳面覆盖有 3 层高反射热防护涂料,由里向外分别是碳化钨(HfC)纳米增韧碳化硅(SiC)陶瓷(韧性高、不开裂、耐高温,2 700 °C)、HfC 涂层(耐高温,3 000 °C)、白色钽酸盐涂层(高反射率,低热导)。经过这些材料的阻挡,热盾背面的温度下降到 500 °C。SCOPE 和 PSP 热盾的相关参数见表 4。为了应对比 PSP 面临的更为恶劣的环境,SCOPE 的热盾必须具备更强的性能。

表 4 SCOPE 和 PSP 热盾的参数与性能对比

Tab.4 Comparisons of the parameters and performance between the thermal shields of the SCOPE and PSP

比较项目	SCOPE	PSP
迎日面最高温度/°C	2 600	1 400
背日面温度/°C	500	315
主体材料	碳泡沫板	碳泡沫板
主体材料厚度/cm	30	11.4
C/C 板厚度/mm	2.5	2.5
迎日面涂层	HfC、SiC、钽酸盐	氧化铝(Al_2O_3)
迎日面直径/m	2.5	2.3
背日面直径/m	2.35	2.3
总质量/kg	<65	72
近日点极限工作时间/h	24	20

3.1.2 抗辐射涂层材料

PSP 的热盾表面使用的是氧化铝涂层,在高温中韧性差、易断裂、隔热降温梯度不足、杨氏模量高,无法满足 SCOPE 的需求。稀土钽酸盐的热-力学性能范围广,兼具低热导率和低热膨胀系数的特点^[59-60],能很好地适应恶劣环境,满足隔热的性能需求。SCOPE 热盾的表面涂料含有重稀土元素钽和铪,惯性大、抗侵蚀性强,可以抵挡太阳风和 CME 粒子,甚至行星际尘埃的侵蚀,同时还能有效抑制

内部裂纹扩展,延长材料寿命。

行星际空间中会影响飞行器的粒子主要来自太阳风、CME 以及行星际尘埃。这些粒子的总能量通量(F_E)见表 5:其中,太阳风 F_E 包括质子与 α 粒子的内能通量和动能通量,CME 的 F_E 就只是动能通量;其次,太阳风粒子和 CME 粒子的 F_E 在 $5R_\odot$ 处测量得到^[61],而尘埃粒子的 F_E 则是在 $20R_\odot$ 处的测量结果^[56]。另外,尘埃最大速度是指尘埃与飞船之间速

度矢量相加得到的最大速度值。太阳风粒子的 F_E 相当于单位时间单位面积上接收到把三、五个鸡蛋举离地面 2 m 所需的能量,但它的影响是不间断的。虽然 CME 粒子的 F_E 高了 3 个量级,但是持续时间很短,速度为 10^3 km/s 的 CME 掠过 SCOPE 的时间不超过 2 min,而且也不是随时都有。根据 CHEN 等^[57]的结果估算,SCOPE 每年遇到的 CME 在 100 个左右,其中速度超过 10^3 km/s 的 CME 占比不到 5%。

表 5 在日心距为 $5R_\odot$ 位置上的中高能粒子和 $20R_\odot$ 尘埃位置上的总能量通量

Tab.5 Total energy flux of middle-high energy particles at a heliocentric distance of $5R_\odot$ and dust at a heliocentric distance of $20R_\odot$

行星际空间中可影响飞行器的主要粒子	太阳风粒子 ^[61] (持续存在)		CME 粒子 ^[61] (偶发,掠过 SCOPE 的时间 < 2 min)		尘埃粒子 ^[56] (持续存在,密度不均匀)	
	质子	α 粒子	速度: 10^3 km·s ⁻¹	密度: 6×10^{-18} g·cm ⁻³	密度: $< 10^{-21}$ g·cm ⁻³	最大速度: 400 km·s ⁻¹
重要参数	速度: 4×10^2 km·s ⁻¹ 密度: 8.36×10^{-20} g·cm ⁻³ 温度: 10^6 K	速度: 5×10^2 km·s ⁻¹ 密度: 1.34×10^{-21} g·cm ⁻³ 温度: 10^7 K				
$F_E/(J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	3.20		3 000		< 0.032	

总而言之,迎面而来的粒子对飞行平台影响最大,可以通过增强热盾材料的性能而化解。来自侧面的粒子的影响要小得多,可参考 PSP 的保护措施加以解决。当然,这个问题还需要进一步探讨。

3.1.3 温差供电系统

太阳附近的高温会给太阳能电池板温控带来巨大压力。PSP 采用传统的太阳能电池供电,在太阳附近通过转动太阳能电池板减小阳光照射面积,最终将每提供 1 W 的电能需要处理的热能降到 13 W。如果 SCOPE 采用相同的供电方式,那么每提供 1 W 的电能要处理的热能将达到 50 W,这对热控系统是个几乎无法克服的困难,因此,需要考虑其他的供电方式。

在远离太阳的地方($> 20R_\odot$)仍然采用太阳能电池板供电,而离开太阳很近时($< 20R_\odot$)将收起太阳能电池板,利用热盾与背景的巨大温差通过热电材料发电。这是一类可以将热能和电能进行直接相互转换的功能材料^[62-63],在深空探测领域发挥着重要作用。在阳光不足以给卫星平台供电的情况下,采用放射性同位素衰变释放的热量,通过这些功能材料完成热电转换的任务。

对 SCOPE 来说,太阳是个巨大的天然热源,不需要携带放射性热源。在卫星抵达预设轨道后,由热盾直面太阳,此时热盾背面的温度有 500°C ,是一个理想的热源。将热电发电模块集成固定在热盾的背面,利用热

盾背面约 $400 \sim 500^\circ\text{C}$ 及深空背景 $3 \sim 4$ K ($-270 \sim -269^\circ\text{C}$) 这一天然温差,即可完成对飞行平台在太阳附近的供电任务,并将温度进一步降低至 100°C 。

3.1.4 先进自适应温控系统

针对不同载荷以及卫星平台的温度需求,SCOPE 将配备一套高效、低功耗、柔性控温系统。根据动态柔性流固换热、介质运输、相变蓄热等多物理场间的传热机理,采用多层次设计流体回路与帆板、辐射器、平台换热器之间的耦合换热布局,实现源热运输、余热补偿、废热排散有效控制。结合自适应热控制方法,通过热流总线内各级流路切换以及流量控制实现热量的高动态管理,使各部分达到最佳工作温度区间。

例如,对于温差供电系统的散热,通过其输出端接入先进自适应温控系统,利用流体回路针对位于该系统的传热接口进行局部温控,将热量传导至全局流体网络,通过流路各节点的监测与智能控制,实现两个系统之间的最佳耦合。在保持有效载荷与辅助设备的工作环境温度处于合理温度范围的同时,温差供电系统的工作效率也达到最佳^[64-65]。

3.2 平台自主管理系统

自主管理作为 SCOPE 探测器重要数据管理与控制的核心,具有遥测遥控信息处理功能、数据存储与下传功能、时基管理与广播功能、指令脉冲发送

功能、主备份模块控制及切换功能、地面测试功能等。针对太阳抵近探测器自主管理中存在的复杂时间约束、资源约束等特点,需要研究自主任务规划技术应用于探测器工程的可行性和解决方案。为完成软硬件顶层设计、自主管理软件信息流设计,将采用分层结构、构件化设计,为各层级间制定标准业务以及接口,使之具有良好的协同开发性能。

3.3 星地通信系统

星地通信可有两个方案。其中,方案 1:采用 X 测控数传一体化体制,配置 2.5 m 口径高增益天线,配合地面现有 70 m 深空应用站,可实现不小于 1 Mb/s 信息码速率传输。方案 2:采用 Ka 高速下行+X 上下行测控数传一体化方案,配置 1.5 m 口径高增益天线,可实现 6 Mb/s 信息码速率传输。目前测控站已具备 Ka 接收能力,应用站需进行 Ka 升级改造。探测器在科学轨道上运行时,以平均 4 h/d 的通信窗口计,数据传输速率为 6 Mb/s,每一轨 59.3 d,见表 3,高倾角轨道的日凌可以忽略不计,那么每轨可以传输的数据量为: $4 \text{ h/d} \times 6 \text{ Mb/s} \times 3600 \text{ s/h} \times 59.3 \text{ d} \approx 5.2 \text{ Tb}$ 。

4 结束语

本文较为详细地介绍了一个旨在近距离接触一颗恒星,并对它的重要特性进行超近距离测量的深空探测计划。SCOPE 轨道的近日点、远日点和倾角分别为 $5R_{\odot}$ 、 $123R_{\odot}$ 和 64.9° ,可抵达日心距近至 $5R_{\odot}$ 、与太阳极点的距离只有 $6R_{\odot}$ 的区域,这里是太阳系中人类从未涉足的区域,是人们完全未知的世界,也是深空探测的“无人区”,在这里进行观测将是太阳物理研究在观测位置上的新突破^[66]。

SCOPE 以 Lin-Forbes 模型为指导,突破极限,进入“无人区”,实地考察未知世界;在国内外其他太阳空间探测任务没有涉足的区域另辟蹊径、独树一帜,破解困扰太阳物理领域的百年难题;为产出原初发现成果提供第一手观测资料,为空间天气精准预报解决基础性科学问题。

SCOPE 与国内其他太阳物理空间探测任务相互配合,以近距离对太阳不同纬度的区域同时进行遥感和原位探测的方式,联合其他在黄道面附近距离太阳 1 AU 的距离上对太阳进行遥感观测的任务^[67-68],获取太阳活动和爆发的立体信息。另外,SCOPE 可以看成是升级版的 SPO^[24],或者 SPO_2.0,可与 SPO 形成在不同距离上对太阳活动与爆发在大纬度范围内进

行联合监测。其次,SCOPE 的多波段光谱成像仪对日面目标的分辨能力与目前我国在建的地基 2.5 m 大视场高分辨率太阳望远镜(FANG 等^[69])的分辨能力相当。两者联测在空间上可实现对光球到日冕的连续观测,追踪和建立光球磁场与日冕磁场之间的联系,证认从光球到日冕的能量传输通道,为解决“驱动太阳爆发的能量如何储存在日冕磁场中?”“太阳风如何从源区加速进入行星际空间?”等问题提供多视角、多波段的观测资料。

参考文献

- [1] FANG C. Space weather comes into our life[J]. Chin. J. Nat., 2006, 28(4): 194-198.
- [2] QIU Y, RAO S H, LI C, et al. Calibration procedures for the CHASE/HIS science data[J]. Sci Sin-Phys. Mech. Astron., 2022, 65: 289603.
- [3] LI C, FANG C, LI Z, et al. The chinese α solar explorer (CHASE) mission: an overview[J]. Sci. China-Phys. Mech. Astron., 2022, 65(8): 289602.
- [4] GAN W Q, ZHU C, DENG Y Y, et al. Advanced space-based solar observatory (ASO-S): an overview[J]. Res. Astron. Astrophys., 2019, 19: 156.
- [5] BAI X Y, TIAN H, DENG Y Y, et al. The solar upper transition region imager (SUTRI) onboard the SATech-01 satellite[J]. Res. Astron. Astrophys., 2023, 23(6): 065014.
- [6] FOX N J, VELLI M C, BALE S D, et al. The solar probe plus mission: humanity's first visit to our star[J]. Space Sci. Rev., 2016, 204: 7-48.
- [7] BALE S D, BADMAN S T, BONNELL J W, et al. Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole[J]. Nature, 2019, 576: 237-242.
- [8] HOWARD R A, VOURLIDAS A, BOTHMER V, et al. Near-Sun observations of an F-corona decrease and K-corona fine structure[J]. Nature, 2019, 576: 232-236.
- [9] MCCOMAS D J, CHRISTIAN E R, COHEN C M S, et al. Probing the energetic particle environment near the sun[J]. Nature, 2019, 576: 223-227.
- [10] KASPER J C, BALE S D, BELCHER J W, et al. Alfvénic velocity spikes and rotational flows in the near-Sun solar wind[J]. Nature, 2019, 576: 228-231.
- [11] KASPER J C, KLEIN K G, LICHKO E, et al. Parker solar probe enters the magnetically dominated solar corona[J]. Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 255101.
- [12] ROMEO O M, BRAGA C R, BADMAN S T, et al. Near-sun in situ and remote-sensing observations of a coronal mass ejection and its effect on the heliospheric current sheet

- [J].*Astrophys.J.*,2023,954:168.
- [13] LIN J, FORBES T G. Effects of reconnection on the coronal mass ejection process[J].*J.Geophys.Res.*,2000,105:2375-2392.
- [14] LIN J. Energetics and propagation of coronal mass ejections in different plasma environments [J]. *Chin. J. Astron. Astrophys.*,2002,2:539-556.
- [15] LIN J, MANCUSO S, VOURLIDAS A. Theoretical investigation of the onsets of type ii radio bursts during solar eruptions[J].*Astrophys.J.*,2006,649:1110-1123.
- [16] TYLKA A J, COHEN C M S, DIETRICH W F, et al. Onsets and release times in solar particle events [C]// KAJITA T, ASAOKA Y, KAWACHI A, et al. Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference. Tokyo: Universal Academy Press,2003:3305-3308.
- [17] KO Y K, FISK L A, GEISS J, et al. An empirical study of the electron temperature and heavy ion velocities in the south polar coronal hole [J]. *Sol. Phys.*,1997,171(2):345-361.
- [18] LANDI E, GRUESBECK J R, LEPRI S T, et al. Charge state evolution in the solar wind. II. Plasma charge state composition in the inner corona and accelerating fast solar wind [J].*Astrophys.J.*,2012,761(1):48.
- [19] SHEN C C, RAYMOND J C, MIKIĆ Z, et al. Time-dependent ionization in a steady flow in an MHD model of the solar corona and wind [J]. *Astrophys. J.*,2017,850(1):26.
- [20] DZIFČÁKOVÁ E, DUDÍK J, ZEMANOVÁ A, et al. KAPPA: A package for the synthesis of optically thin spectra for the non-Maxwellian κ -distributions. II. Major update to compatibility with CHIANTI version 10 [J]. *Astrophys.J.Suppl.Ser.*,2021,257(2):62.
- [21] PARKER E N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields [J].*Astrophys.J.*,1958,128:664.
- [22] RAOUAFI N E, STENBORG G, SEATON D B, et al. Magnetic reconnection as the driver of the solar wind [J]. *Astrophys.J.*,2023,945(1):28.
- [23] MULLER D, ST CYR O C, ZOUGANELIS I, et al. The solar orbiter mission. Science overview [J]. *Astron. Astrophys.*,2020,642:A1.
- [24] DENG Y Y, ZHOU G P, DAI S W, et al. Solar polar-orbit observatory [J].*Chin.Sci.Bull.*,2023,68(4):298-308.
- [25] CIARAVELLA A, RAYMOND J C, LIN J, et al. Elemental abundances and post-coronal mass ejection current sheet in a very hot active region [J].*Astrophys.J.*,2002,575:1116-1130.
- [26] LIN J, KO Y K, SUI L, et al. Direct observations of the magnetic reconnection site of an eruption on 2003 November 18 [J].*Astrophys.J.*,2005,622:1251-1264.
- [27] LIN J, LI J, FORBES T G, et al. Features and properties of coronal mass ejection/flare current sheets [J].*Astrophys. J.*,2007,658:123-126.
- [28] LIN J, LI J, KO Y K, et al. Investigation of thickness and electrical resistivity of the current sheets in solar eruptions [J].*Astrophys.J.*,2009,693:1666-1677.
- [29] QIU J, WANG H M, CHENG C Z, et al. Magnetic reconnection and mass acceleration in flare-coronal mass ejection events [J].*Astrophys.J.*,2004,604(2):900.
- [30] KO Y K, RAYMOND J C, LIN J, et al. Dynamical and physical properties of a post-coronal mass ejection current sheet [J].*Astrophys.J.*,2003,594:1068-1084.
- [31] LIN J, MURPHY N A, SHEN C C, et al. Review on current sheets in CME development: theories and observations [J].*Space Sci.Rev.*,2015,194:237-302.
- [32] LIN J, NI L. Large-scale current sheets in flares and CMEs [J].*Geophys.Monograph Ser.*,2018,235:239-255.
- [33] YE J, RAYMOND J C, MEI Z X, et al. Three-dimensional simulation of thermodynamics on confined turbulence in a large-scale CME-flare current sheet [J].*Astrophys.J.*,2023,955(2):88.
- [34] BEMPORAD A, SHI G L, LI S T, et al. First determination in the extended corona of the 2d thermal evolution of a current sheet after a solar eruption [J]. *Astrophys.J.*,2024,964(1):92.
- [35] LI Y, LIN J. Acceleration of electrons and protons in reconnecting current sheets including single or multiple X-points [J].*Sol.Phys.*,2012,279(1):91-113.
- [36] LI Y, WU N, LIN J. Charged-particle acceleration in a reconnecting current sheet including multiple magnetic islands and a nonuniform background magnetic field [J]. *Astron.Astrophys.*,2017,605:120.
- [37] LI Y, NI L, YE J, et al. Particle accelerations in a 2.5-dimensional reconnecting current sheet in turbulence [J]. *Astrophys.J.*,2022,938(1):24.
- [38] BIAN N H, LI G. Lagrangian perspectives on the small scale structure of Alfvénic turbulence and stochastic models for the dispersion of fluid particles and magnetic field lines in the solar wind [J].*Astrophys.J.Suppl.Seri.*,2024,273(15):ad4a5c.
- [39] XIE X Y, LI G, REEVES K K, et al. Probing turbulence in solar flares from SDO/AIA emission lines [J].*Frontier in Astron.Space Sci.*,2024,11:1383746.
- [40] MITRA-KRAEV U, BENZ A O. A nanoflare heating model for the quiet solar corona [J].*Astron.Astrophys.*,2001,373:318-328.

- [41] ASGARI-TARGHI M, VAN BALLEGOOIJEN A A, CRANMER S R, et al. The spatial and temporal dependence of coronal heating by Alfvén wave turbulence [J]. *Astrophys.J.*, 2013, 773: 111.
- [42] CIRTAIN J W, GOLUB L, WINGEBARGER A, et al. Energy release in the solar corona from spatially resolved magnetic braids [J]. *Nature*, 2013, 493: 501-503.
- [43] VAN BALLEGOOIJEN A A, ASGARI-TARGHI M, CRANMER S R, et al. Heating of the solar chromosphere and corona by alfvén wave turbulence [J]. *Astrophys.J.*, 2011, 736(1): 3.
- [44] CRANMER S R, ASGARI-TARGHI M, MIRALLES M P, et al. The role of turbulence in coronal heating and solar wind expansion [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 2015, 373(2041): 20140148.
- [45] ASCHWANDEN M J. Reconciling power-law slopes in solar flare and nanoflare size distributions [J]. *Astrophys.J. Lett.*, 2022, 934(1): L3.
- [46] CARGILL P J. Active region emission measure distributions and implications for nanoflare heating [J]. *Astrophys.J.*, 2014, 784(1): 49.
- [47] LIU J J, CARLSSON M, NELSON C J, et al. Co-spatial velocity and magnetic swirls in the simulated solar photosphere [J]. *Astron. Astrophys.*, 2019, 632: A97.
- [48] PARKER E N. The solar-flare phenomenon and the theory of reconnection and annihilation of magnetic fields [J]. *Astrophys.J. Suppl. Ser.*, 1963, 8: 177.
- [49] LIN J, RAYMOND J C, VAN BALLEGOOIJEN A A. The role of magnetic reconnection in the observable features of solar eruptions [J]. *Astrophys.J.*, 2004, 602(1): 422-435.
- [50] SCHMIEDER B, TIAN H, KUCERA T, et al. Open questions on prominences from coordinated observations by IRIS, Hinode, SDO/AIA, THEMIS, and the Meudon/MSDP [J]. *Astron. Astrophys.*, 2014, 569: A85.
- [51] MANCUSO S, GARZELLI M V. Radial profile of the inner heliospheric magnetic field as deduced from Faraday rotation observations [J]. *Astron. Astrophys.*, 2013, 553: A100.
- [52] KUMARI A, RAMESH R, KATHIRAVAN C, et al. Direct estimates of the solar coronal magnetic field using contemporaneous extreme-ultraviolet, radio, and white-light observations [J]. *Astrophys.J.*, 2019, 881(1): 24.
- [53] KURIDZE D, MATHIOUDAKIS M, MORGAN H, et al. Mapping the magnetic field of flare coronal loops [J]. *Astrophys.J.*, 2019, 874(2): 126.
- [54] FLEISHMAN G D, GARY D E, CHEN B, et al. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare [J]. *Science*, 2020, 367 (6475): 278-280.
- [55] YANG Z H, BETHGE C, TIAN H, et al. Global maps of the magnetic field in the solar corona [J]. *Science*, 2020, 369: 694-697.
- [56] SZALAY J R, POKORNÝ P, BALE S D, et al. The near-sun dust environment: initial observations from Parker Solar Probe [J]. *Astrophys.J. Suppl. Ser.*, 2020, 246(2): 27.
- [57] CHEN Y H, LIU Z, CHEN P F, et al. Can the Parker Solar Probe detect a CME-flare current sheet? [J]. *Astrophys.J. Suppl. Ser.*, 2023, 269(1): 22.
- [58] 杭观荣, 李林, 郭曼丽, 等. 国外电喷推进技术发展及趋势 [J]. *飞控与探测*, 2022, 5(4): 1-11.
- [59] FENG J, SHIAN S, XIAO B, et al. First-principles calculations of the high-temperature phase transformation in yttrium tantalate [J]. *Phys. Rev. B.*, 2014, 90(9): 094102.
- [60] CHEN L, LI B H, FENG J. Rare-earth tantalates for next-generation thermal barrier coatings [J]. *Progress in Mater. Sci.*, 2024, 144: 101265.
- [61] PRIEST E R. *MHD of the sun* [M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2014.
- [62] Bell L E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems [J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1457-1461.
- [63] ZHANG S, LIU Z, ZHANG X, et al. Sustainable thermal energy harvest for generating electricity [J]. *The Innovation*, 2024, 5(2): 100591.
- [64] LIU L, BAO K L, FENG J C, et al. Design and analysis of an advanced thermal management system for the solar close observations and proximity experiments spacecraft [J]. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2024, 1(1): 52-61.
- [65] BAO K L, ZHU X F, FENG J C, et al. Application and prospect of the fluid cooling system of solar arrays for probing the Sun [J]. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2024, 1(1): 62-70.
- [66] 吴季. 技术创新是未来空间科学发展的关键因素 [J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(5): 891-898.
- [67] 方成, 丁明德, 陈鹏飞, 等. 日地 L5 太阳探测工程概述 [J]. *上海航天(中英文)*, 2024, 41(3): 9-16.
- [68] WANG Y M, BAI X Y, CHEN C Y, et al. Solar ring mission: building a panorama of the sun and inner-heliosphere [J]. *Advances in Space Research*, 2023, 71: 1146.
- [69] FANG C, GU B Z, YUAN X Y, et al. 2.5 m wide-field and high-resolution telescope [J]. *Sci Sin-Phys. Mech. Astron.*, 2019, 49: 059603.