

太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究

张爱兵^{1,2,3,4}, 李晖^{1,5}, 孔令高^{1,2,3}, 张坤毅^{1,2,3,4}, 付利平^{1,2,3},
薛洪波^{1,5}, 杨建峰⁶, 何志平⁷, 王玲华⁸, 李延伟⁹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190;
3. 中国科学院 空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190; 4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190; 6. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710119;
7. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 8. 北京大学, 北京 100871; 9. 斯图加特大学, 斯图加特 70569)

摘要: 针对我国目前正在论证的太阳系边际探测任务的科学目标, 提出了科学载荷配置建议, 包括场、粒子和光学3大类共10台载荷, 给出了载荷的性能指标需求及重量和功耗等工程需求。各载荷的方案兼顾指标先进性和研制周期紧迫性, 集中了国内多个单位的技术优势, 具有较好的技术基础和继承性。针对该超远距离探测任务, 提出了载荷小型化和低功耗、高可靠和长寿命、科学数据处理和压缩等共性关键技术及初步解决方案。载荷配置主要立足国内, 同时结合已有的国际合作基础, 国际合作将会发挥更大作用。

关键词: 太阳系边际探测; 科学载荷; 载荷小型化

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)06-0545-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200060

引用格式: 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.

Reference format: 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.

引言

太阳系边际是人类渴望认知的太空未知领域, 但太阳系边际探测任务实施难度极高, 迄今为止只开展了“先驱者10号”(Pioneer 10)、“先驱者11号”(Pioneer 11)、“旅行者1号”(Voyager 1)和“旅行者2号”(Voyager 2)任务, “新视野号”(New Horizon)计划在完成预定目标后开展星际任务拓展^[1], 具体情况见表1。近些年“旅行者1号”和“旅行者2号”逐渐飞出日球层, 使得太阳系边际探测也逐渐成为空间探索的新热点。欧洲和美国的科学家分别提出了新的探测任务^[2-3](如表1中的IHP/HEX和IIE), 并正在积极推动任务的实施。

随着我国月球和深空探测任务的顺利实施, 开展太阳系边际探测也提到议事日程, 国内也正在开展相关论证工作。科学载荷是太阳系边际探测任务的重要组成部分, 文献[2]~[9]分别给出了载荷配置, 其中“先驱者号”“旅行者号”“新视野号”、IHP/HEL (Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric Explorer) 及

IIE (Innovative Interstellar Explorer) 的汇总情况如表2所示。

本文针对我国近期正在论证的太阳系边际探测任务, 结合目前载荷的技术基础, 给出科学载荷配置建议。

表1 国外太阳系边际探测任务
Table 1 Overseas Solar system boundary exploration missions

| 任务名称 | 发射时间 | 国别 |
|-----------------------|------------|----|
| 先驱者10号 | 1972-03-03 | 美国 |
| 先驱者11号 | 1973-04-06 | 美国 |
| 旅行者1号 | 1977-09-05 | 美国 |
| 旅行者2号 | 1977-08-20 | 美国 |
| 新视野号 | 2006-01-19 | 美国 |
| IHP/HEX ^{注1} | — | 欧洲 |
| IIE ^{注2} | — | 美国 |

注1: Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric Explorer

注2: Innovative Interstellar Explorer

收稿日期: 2020-08-19 修回日期: 2020-10-14

基金项目: 中国科学院专项资助项目(XDA15052500, QYZDJ-SSW-JSC028)

表 2 国外太阳系边际探测任务的载荷配置

Table 2 Payloads of overseas Solar system boundary exploration missions

| 载荷类别 | 载荷名称 | 先驱者号 | 旅行者号 | 新视野号 | IHP/HEX | IIE | 中国太阳系边际探测 |
|------|-------------------|------|------|------|---------|-----|-----------|
| 场 | 矢量磁强计 | √ | √ | × | √ | √ | √ |
| | 磁通门磁强计 | √ | × | × | × | × | × |
| | 等离子体波探测器 | × | √ | × | √ | √ | × |
| 粒子 | 等离子体探测器 | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | 离子成分探测器 | × | × | × | √ | × | √ |
| | 能量粒子谱仪 | √ | √ | √ | √ | √ | √ |
| | 宇宙线谱仪-ACR/GCR | √ | √ | × | √ | √ | √ |
| | 宇宙线谱仪-E/Po/Pr/He | √ | × | × | √ | √ | √ |
| | 盖革管望远镜 | √ | × | × | × | × | × |
| | 能量中性原子探测器 | × | × | × | √ | √ | √ |
| | 微流星探测器 | √ | × | × | × | × | × |
| | 宇宙尘埃探测器 | √ | × | √ | √ | √ | √ |
| 光学 | 相机系统 | × | √ | √ | × | × | √ |
| | 红外探测器 | √ | √ | √ | × | × | √ |
| | 成像光偏振仪 | √ | √ | × | × | × | × |
| | L- α 紫外探测器 | √ | √ | √ | √ | √ | √ |

1 科学目标及载荷配置

我国正在论证的到达100 AU左右的太阳系边际探测任务的科学目标包括4方面^[10]：①星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性，主要研究内容包括太阳风的拾起过程（探测对象为等离子体、拾起离子、行星际磁场）、银河宇宙线的日球层调制（探测对象为高能带电粒子）、中性原子和尘埃的太阳引力聚焦（探测对象为中性原子、尘埃）、行星际尘云之谜（探测对象为尘埃）；②太阳系其它天体特性；主要研究内容包括冰巨星及其卫星系统的特性（探测对象为可见光、紫外光、红外光、等离子体、磁场）、半人马族小行星（探测对象为可见光、紫外光、红外光）、柯伊伯带天体（探测对象为可见光、紫外光、红外光）；③太阳系边际的结构和特性，主要研究内

容包括终止激波特性（探测对象为等离子体、拾起离子、行星际磁场）、异常宇宙线的起源和加速机制之谜（探测对象为中高能带电粒子）；④河外背景光之谜，主要研究内容为河外背景光（探测对象为可见光、紫外光、红外光）。

科学目标对应的探测对象可分为3类，即场（磁场）、粒子（等离子体、拾起离子、高能带电粒子、中能带电粒子、中性原子、尘埃粒子）和光学（可见光、紫外光和红外光）。根据上述探测对象，结合各类载荷的基本工作原理，可以给出载荷的配置。科学目标、探测对象、载荷类别及载荷的对应关系如图1所示。根据被测对象的参数特征及我国目前各类载荷的技术现状，建议的载荷性能指标如表3所示，载荷的重量和功耗工程需求如表4所示。根据我国太阳系边际探

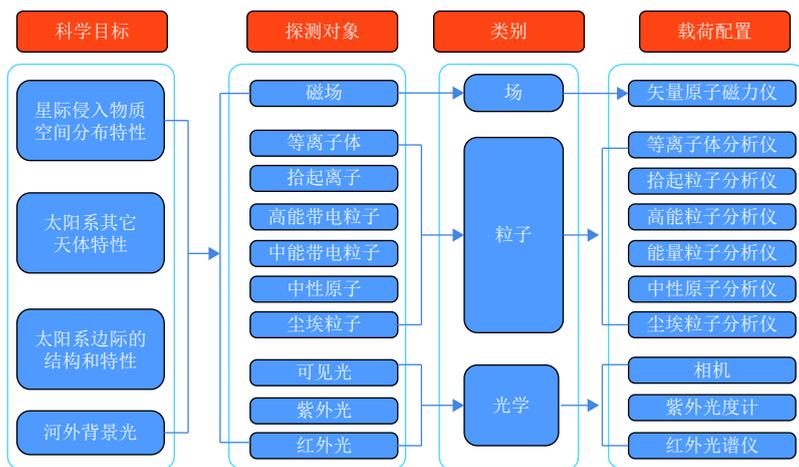


图 1 科学目标-探测对象-载荷类别-载荷配置对应关系

Fig. 1 Relationship between scientific objectives, measurands, payload category and payloads

表3 载荷性能指标
Table 3 Performance of payloads

| 载荷类别 | 载荷名称 | 性能指标 | 国外载荷指标 | 对应科学目标 |
|------|---|--|--|---|
| 场 | 矢量原子磁力仪 | 小场量程/nT: ± 8 小场灵敏度/(nT·Hz ^{-1/2}): ≤ 0.001 小场零点准确度/nT: ≤ 0.05 大场量程/nT: $\pm 700\ 00$ 大场灵敏度/(nT·Hz ^{-1/2}): ≤ 0.05 大场零点准确度/nT: ≤ 3 | 量程/nT: ± 4 、 ± 14 、 ± 42 、 ± 640 、 ± 4000 、 $\pm 22\ 000$ 、 $\pm 140\ 000 \pm 4$ 范围灵敏度: 10 pT/Hz ^{1/2} (先驱者) | 星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性、太阳系其它天体特性、太阳系边际的结构和特性 |
| | | 离子能量/keV: 0.005~30 电子能量/keV: 0.005~30 能量分辨率/%: 优于8 视场/(°): 180×8 角度分辨/(°): 22.5×8 | 离子能量/keV: 0.2~50 (IHP/HEX) | 星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性、太阳系其它天体特性、太阳系边际的结构和特性 |
| | 拾起离子分析仪 | 能量范围/keV: 0.002~40 能量分辨率/%: 优于5 视场/(°): 180×8 角度分辨/(°): 22.5×8 成分分辨: H ⁺ 、He ⁺ 、He ²⁺ 、N ⁺ 、O ⁺ 、Ne ⁺ 等 | 能量范围/keV: 0.02~20 (IHP/HEX) | 星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性、太阳系边际的结构和特性 |
| 粒子 | 高能粒子分析仪 | 质子/MeV: 7~300 电子/MeV: 200~10 重离子/(MeV·n ⁻¹): 10~300 测量方向: 3个, 40°/方向 | 质子/MeV: 1~130 电子: 100 keV~30MeV 重离子/(MeV·n ⁻¹): 2~260 测量方向: 1个, 视场35° (IIE) | 星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性、太阳系边际的结构和特性 |
| | 能量粒子分析仪 | 质子/keV: 20~7 电子/keV: 20~400 重离子/(MeV·n ⁻¹): 0.5-20 测量方向: 各3个 (e/p/ion), 30°/方向 | 离子: 20 keV/n~5MeV/n 电子/keV: 25~800 测量方向: 6个, 总视场160°×12° (IIE) | 太阳系边际的结构和特性 |
| | 中性原子分析仪 | 能量范围/keV: 0.01~300 成分分辨: H、He、O、Ne 视场/(°): 180×2 (H), 160×9 (L) 角度分辨/(°): 3×2 (H), 30×° (L) | 能量范围: 10eV~10 keV 视场: 6°×6° (H), 单像素 (L) (IIE) | 星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性 |
| | 尘埃探测器 | 探测面积/cm ² : 400 尘埃质量/kg: 10 ⁻¹⁷ ~10 ⁻⁹ 尘埃速度/(km·s ⁻¹): 1~5*10 ³ 尘埃带电量 (C): 10 ⁻¹⁶ ~10 ⁻¹³ | 12块PVF面板探测尘埃 (新视野) | 星际中性原子、星际尘埃等侵入物质的空间分布特性 |
| 光学 | 相机 | 窄视场多光谱: 焦距1 200 mm, 口径150 mm, F数8, 视场0.78°×1.05°, 波长460~1 000 nm, 多光谱6~8通道 | 波长/nm: 400-975 视场/(°) 5.7×0.15 (新视野) | |
| | | 宽视场多光谱: 焦距150 mm, 口径37.5 mm, F数4, 视场6.28°×8.34°, 波长460~1 000 nm, 多光谱6~8通道 | | 太阳系其它天体特性、河外背景光之谜 |
| | 广角: 焦距38 mm, 口径20 mm, F数1.9, 视场30°×90° (四个视场30°×23.4°的相同相机组成), 波长600~1 000 nm | | | |
| | 紫外光度计 | 波长/nm: 121.6、58.4 视场/(°): 4×4 | 波长/nm: 121.6 视场: 4°×4° (IIE) | 河外背景光之谜 |
| | 红外光谱仪 | 光谱范围/μm: 1.0~16.0 光谱分辨率/(cm ⁻¹): ≤ 9 成像视场/(°): ~0.5 | 光谱范围: 1.25 μm~2.5 μm 成像视场: 0.9° (新视野) | 太阳系其它天体特性、河外背景光之谜 |

测任务对于载荷的重量约束条件^[10] (≤ 50 kg) 以及目前国内同类载荷的功耗情况, 配置的各台载荷的重量和功耗情况如表4所示。

除重量和功耗方面的基本工程需求外, 部分载荷还有如下需求: ①为使得粒子类载荷实现全空间探

测, 卫星平台的姿态应为自旋稳定 (周期 ≥ 1 min), 自旋轴垂直于黄道面; ②为减小剩磁对矢量原子磁力仪的影响, 矢量原子磁力仪要求使用伸杆 (长度待定), 杆端姿态精度 $< 0.1^\circ$, 同时卫星平台应进行剩磁控制, 使得矢量原子磁力仪传感器所在位置处剩磁

$< 1\text{nT}$; ③为减小表面电位对等离子体分析仪和拾起离子分析仪探测能量低端的影响, 卫星平台应采取表面电位控制措施, 使得表面电位控制在 2V 以内; ④各载荷的电子学可进一步开展统一集成化设计, 从而使得重量和功耗可进一步减少。

表4 载荷工程需求

Table 4 Engineering requirements of payloads

| 序号 | 载荷名称 | 重量/kg | 功耗/W |
|----|---------|-------|------|
| 1 | 矢量原子磁力仪 | 4 | 15 |
| 2 | 等离子体分析仪 | 4 | 8 |
| 3 | 拾起离子分析仪 | 5 | 12 |
| 4 | 高能粒子分析仪 | 4 | 6 |
| 5 | 能量粒子分析仪 | 3.5 | 6 |
| 6 | 中性原子分析仪 | 3 | 5 |
| 7 | 尘埃探测器 | 6.5 | 10 |
| 8 | 相机 | 11 | 26 |
| 9 | 紫外光度计 | 1.5 | 2 |
| 10 | 红外光谱仪 | 7.5 | 60 |
| | 合计 | 50 | 150 |

2 科学载荷研究基础

2.1 磁场探测

“萤火1号”“风云4号”“风云3号”“天问1号”、电磁试验卫星等航天型号上搭载了磁通门磁强计开展磁场测量; 在“鲲鹏-1B”探空火箭上开展了基于磁阻的磁场测量; 在地磁测绘等航空磁测方面, 开展了基于磁通门磁强计及标量CPT原子磁力仪的磁场测量; 在预研项目中完成了激光光泵原子磁力仪工程样机的研制和测试。

太阳系边际探测项目中的矢量原子磁力仪可继承电磁试验卫星磁强计及激光光泵原子磁力仪工程样机的技术方案, 电磁试验卫星磁强计正样产品及激光光泵原子磁力仪工程样机如图2所示, 并开展一定的关键技术攻关, 总体上具有较好的技术基础和继承性。



(a) 电磁试验卫星磁强计 (b) 激光光泵原子磁力仪

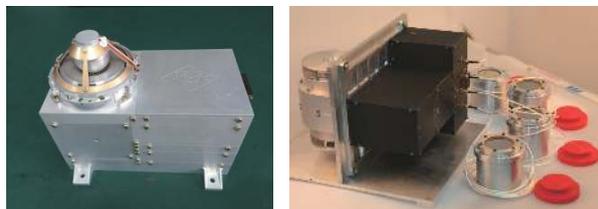
图2 矢量原子磁力仪的继承载荷

Fig. 2 Payloads from which Vector Atomic Magnetometer can draw on heritage

2.2 低能带电粒子探测

从20世纪90年代开始, 先后在“实践4号”“资源

1号”“神舟4号”“双星计划”“嫦娥1号”“嫦娥2号”“萤火1号”“风云4号”“天舟1号”电磁试验卫星、“天问1号”等多个型号上配置了低能带电粒子探测载荷, 产品的技术水平和性能指标不断提高, 目前已达到国际水平(“天问1号”火星离子与中性粒子分析仪的指标达到国际先进水平)。太阳系边际探测项目中的等离子体分析仪可直接继承“天舟1号”全向电子能谱仪、“风云4号”01星低能粒子探测器的技术方案, “天舟1号”全向电子能谱仪及“风云4号”01星低能粒子探测器正样产品如图3所示, 仅需进行小型化改进, 具有非常好的技术基础和继承性; 拾起离子分析仪可继承“天问1号”火星离子与中性粒子分析仪及电磁试验卫星等离子体分析仪的技术方案(通过离子能谱结构识别太阳风离子和拾起离子), 并开展一定的关键技术攻关, “天问1号”火星离子与中性粒子分析仪及电磁试验卫星等离子体分析仪正样产品如图4所示。



(a) “天舟1号”全向电子能谱仪 (b) “风云4号”01星低能粒子探测器

图3 等离子体分析仪的继承载荷

Fig. 3 Payloads from which Plasma Analyzer can draw on heritage



(a) “天问1号”火星离子与中性粒子分析仪 (b) 电磁试验卫星等离子体分析仪

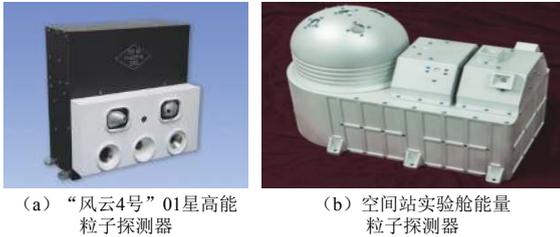
图4 拾起离子分析仪的继承载荷

Fig. 4 Payloads from which Pick-up Ion Analyzer can draw on heritage

2.3 中高能带电粒子探测

从1971年的“实践1号”开始, 在“实践2号”“东方红2号”“风云1号”“实践4号”“实践4号”、“风云2号”“资源1号”“神舟4号”“神舟5号”双星计划“实践6号”“北斗系列”“嫦娥1号”“嫦娥1号”“风云3号”“天宫1号”“天宫1号”“风云4号”等多个型号上配置了中高能带电粒子探测载荷, 产品的技术水平和性能指标不断提高, 目前在研的空间站实验舱能量粒子探测器性能指标达到国际先进水平。太阳系边际探测项目中的高能粒子分析仪可直接继承“风云4号”01星高能粒子探测器及空间站实验舱能量粒子探测器的技术方案, “风云4号”01星高能粒子探测器正样产品及空间站实验舱能量粒子探测

器样机如图5所示，仅需进行小型化改进，具有非常好的技术基础和继承性；能量粒子分析仪可直接继承北斗卫星中能电子探测器及“风云3号”05星中能粒子探测器的技术方案，进行改进，北斗卫星中能电子探测器及“风云4号”02星中能质子探测器正样产品如图6所示。



(a) “风云4号”01星高能粒子探测器 (b) 空间站实验舱能量粒子探测器

图 5 高能粒子分析仪的继承载荷

Fig. 5 Payloads from which High Energy Particle Analyzer can draw on heritage



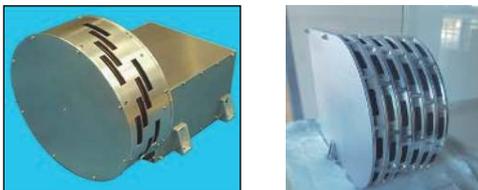
(a) 北斗卫星中能电子探测器 (b) “风云4号”02星中能质子探测器

图 6 能量粒子分析仪的继承载荷

Fig. 6 Payloads from which Energetic Particle Analyzer can draw on heritatesatellite

2.4 中性原子探测

我国在中欧合作双星计划中参与了欧方负责的中性原子成像仪的研制，研制了中国科学院空间科学先导专项MIT计划的中性原子探测仪原理样机，“双星计划探测2号”中性原子成像仪正样产品及中国科学院先导专项MIT计划中性原子探测仪工程样机如图7所示，“天问1号”上配置的火星离子与中性粒子分析仪具备低能量中性原子探测功能，国家基金委支持的重大科研仪器研制项目——千线阵列中性原子成像仪样机正在研制中。太阳系边际探测项目中的中性原子探测仪将继承上述仪器的部分技术，并在此基础上开展一定的关键技术攻关。



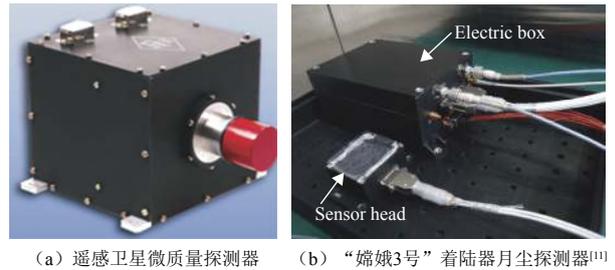
(a) “双星计划探测2号”中性原子成像仪 (b) 中科院先导专项MIT计划中性原子探测仪

图 7 中性原子探测仪高能探测部分的继承载荷

Fig. 7 Payloads from which high energy part of Energetic Neutral Atom Analyzer can draw on heritage

2.5 尘埃探测

我国在遥感卫星配置了微质量探测器、在“嫦娥3号”着陆器上配置了月尘探测器，这两台载荷均对尘埃累积质量进行探测；在尘埃粒子的质量、速度和带电量参数探测方面，还没有相关载荷开展探测。太阳系边际探测项目中的尘埃探测器将对尘埃的质量、速度和带电量进行探测，因此还需开展关键技术攻关、样机的研制和测试，或者可采取国际合作的方式，遥感卫星微质量探测器及“嫦娥3号”着陆器月尘探测器正样产品如图8所示。



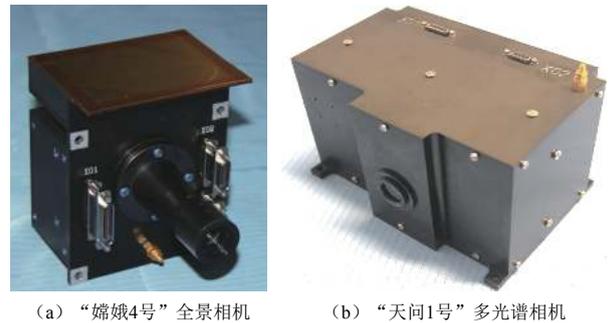
(a) 遥感卫星微质量探测器 (b) “嫦娥3号”着陆器月尘探测器^[1]

图 8 国内已有的尘埃探测载荷^[1]

Fig. 8 Current payloads for dust measurement in China

2.6 可见光探测

探月工程的各次任务均配置了可见光探测载荷，包括“嫦娥1号”干涉成像光谱仪及CCD立体相机，“嫦娥2号”CCD立体相机，“嫦娥3号”和“嫦娥4号”全景相机、地形地貌相机及降落相机；“天问1号”火星探测器配置了高分辨率相机、中分辨率相机及多光谱相机，“嫦娥4号”全景相机及“天问1号”多光谱相机正样产品如图9所示。在可见光成像探测方面积累丰富的经验，载荷性能指标也不断提高。太阳系边际探测项目中的相机可直接继承“嫦娥3号”和“嫦娥4号”全景相机及“天问1号”多光谱相机的技术方案，仅需进行小型化改进，具有非常好的技术基础和继承性。



(a) “嫦娥4号”全景相机 (b) “天问1号”多光谱相机

图 9 相机的继承载荷

Fig. 9 Payloads from which Camera can draw on heritage

2.7 紫外探测

我国在风云卫星上配置了紫外探测载荷，包括“风

云3号”A/B/C星的紫外臭氧总量探测仪、“风云3号”F星的紫外高光谱臭氧总量探测仪、“风云3号”D星的电离层光度计,在紫外和真空紫外载荷研制和定标方面积累的丰富的经验,研制的紫外臭氧总量探测仪、远紫外电离层光度计等载荷性能指标与国际同类载荷水平相当,部分性能指标优于国际同类产品,“风云3号”D星电离层光度计正样产品如图10所示。太阳系边际探测项目中的紫外光度计可直接继“风云3号”D星的电离层光度计的技术方案,进行小型化改进。

2.8 红外探测

我国探月工程的“嫦娥3号”和“嫦娥4号”配置了红外成像光谱仪、“嫦娥5号”和“嫦娥6号”配置了月球矿物光谱分析仪,“天问1号”火星探测器配置了火星矿物光谱分析仪,此外“风云4号”气象卫星配置了干涉式大气垂直干涉仪。目前红外探测载荷方面经验丰富,载荷性能指标先进。太阳系边际探测项目中的红外光谱仪可继承“天问1号”火星矿物光谱分析仪及“嫦娥6号”月球矿物光谱分析仪的技术方案,并开展一定的关键技术攻关,具有较好的技术基础和继承性,“天问1号”火星矿物光谱分析仪及“嫦娥6号”月球矿物光谱分析仪正样产品如图11所示。

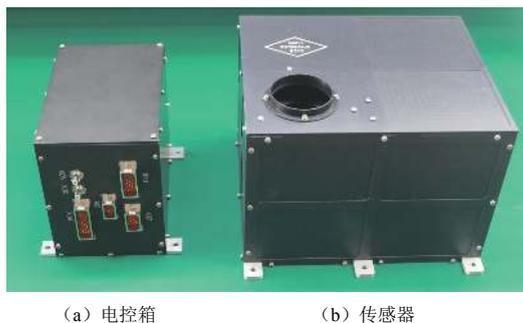


图10 紫外光度计的继承载荷

Fig. 10 Payloads from which UV Photometer can draw on heritage

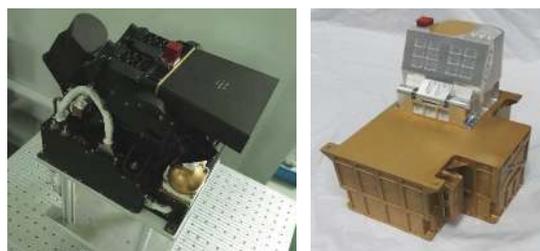


图11 红外光谱仪的继承载荷

Fig. 11 Payloads from which Infrared Spectrometer can draw on heritage

各载荷的继承性汇总情况如表5所示。

表5 国内载荷继承性

Table 5 Summary of heritage of domestic payloads

| 序号 | 载荷名称 | 继承型号 | 继承性 |
|----|---------|---------------------------------------|------------------|
| 1 | 矢量原子磁力仪 | 电磁试验卫星磁强计 | 部件继承, 还需开展关键技术攻关 |
| 2 | 等离子体分析仪 | “天舟1号”全向电子能谱仪、“风云4号”01星低能粒子探测器 | 完全继承、小型化改造 |
| 3 | 拾起离子分析仪 | “天问1号”火星离子与中性粒子分析仪、电磁试验卫星等离子体分析仪 | 部件继承, 还需关键技术攻关 |
| 4 | 高能粒子分析仪 | “风云4号”01星高能粒子探测器、空间站实验舱能量粒子探测器 | 完全继承、小型化改造 |
| 5 | 能量粒子分析仪 | 北斗卫星中能电子探测器、“风云3号”05星中能粒子探测器 | 完全继承、小型化改造 |
| 6 | 中性原子分析仪 | “天问1号”火星离子与中性粒子分析仪、国家基金委支持的重大科研仪器研制项目 | 部件继承, 还需关键技术攻关 |
| 7 | 尘埃探测器 | 无 | — |
| 8 | 相机 | “嫦娥3号”“嫦娥4号”全景相机、“天问1号”多光谱相机 | 完全继承、小型化改造 |
| 9 | 紫外光度计 | “风云3号”D星电离层光度计 | 完全继承、小型化改造 |
| 10 | 红外光谱仪 | “天问1号”火星矿物光谱分析仪、“嫦娥6号”月球矿物光谱分析仪 | 部件继承, 还需关键技术攻关 |

3 关键技术

虽然科学载荷目前的技术基础和继承性较好,但对于超远距离、超长寿命、超宽范围探测参数的太阳系边际探测任务,还有部分关键技术需要攻关,包括各载荷特定关键技术和共性关键技术。载荷特定关键技术是指与各载荷探测对象和工作原理相关的关键技术;共性关键技术是指各载荷均涉及的关键技术(可通过共同攻关完成),这些技术还需尽快开展攻关工作。

3.1 载荷特定关键技术

1) 矢量原子磁力仪的超低噪声无磁加热技术,关键突破点在于利用电流转化为热量过程中电流本身产生的磁场不应影响磁力仪磁场传感。解决方案:利用精密的高频交流电流加热,控制其干扰水平远低于传感器灵敏度。

2) 拾起离子分析仪的高分辨率拾起离子探测技术,难点在于拾起离子密度极低、同时能量展宽又比较窄,因此需要在大几何因子条件下实现高能量分辨率的探测。解决方案:采用大几何因子的静电分析器

作为主体，同时增加阻滞势分析器与其配合实现高能分量分辨率。

3) 红外光谱仪的高辐射背景抑制的红外分光组件技术，瓶颈为：100 K的低温高可靠高性能分光组件。解决方案：采用无热化低温光机设计与制备工艺。

3.2 共性关键技术

1) 小型化和低功耗技术

考虑到工程的可实现性及成本，整个探测器的总重量和总功耗应尽量小，这就要求科学载荷满足轻小型化和低功耗要求。载荷轻小型化方面，可采用新加工技术（如3D打印等）以及新材料（如碳纤维、高性能非金属材料等），并改进由于受传统加工手段和材料限制而采用的仪器构型，实现结构的轻小型化。载荷低功耗方面，首先可将各载荷功能相似的部分（如电源、数据采集及处理等）进行合并、设计高度集成化载荷共用电子学，其次是进行低功耗电子学总体方案设计、采用极低功耗电子学元器件。

2) 高可靠长寿命技术

载荷在轨工作时间长（超过20 a），要求在小型化的前提下实现高可靠和长寿命。对于科学载荷来说，探测器（硅半导体探测器、微通道板探测器等）是影响其可靠性和寿命的关键部件，因此需重点针对探测器开展工作。解决措施包括：改进探测器的设计、加工或工艺，从本质上提升其使用寿命；在使用方面采用可延长其寿命的使用方法，如选择合适的探测器增益等；研究可能的在轨补偿措施。针对上述措施，还需开展使用地面设备进行寿命加速试验验证方法研究，并完成长寿命的地面验证。

3) 科学数据处理和压缩技术

由于探测器的超远距离飞行限制了数据下行带宽，而载荷的科学数量又较大，因此需要在满足科学研究的前提下对科学数据进行处理和压缩。各载荷的科学数据特点及容量均不同，因此需要针对每种载荷的科学数据开展处理和压缩方法的研究，包括关键科学信息（如粒子与场探测载荷参数变化量、光学成像载荷成像目标等）的定位和提取算法，以及科学数据的高效率处理算法、高压缩比的压缩算法（如粒子与场探测载荷原始数据转换为物理量、无损压缩等，光学成像载荷图像采用目前民用领域先进的高效率压缩算法等），此外上述算法应具备在轨自动执行并根据科学数据的内容自动调整的能力。

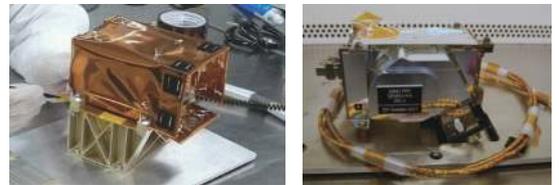
4 国际合作

在月球与深空探测领域的科学载荷方面，我国的

探月工程“嫦娥4号”以及火星探测任务“天问1号”均已开展了一定的国际合作，合作过程顺利，积累了丰富的国际合作经验，其中与太阳系边际探测相关载荷的情况如表6所示，“嫦娥4号”国际合作载荷月球中子与辐射剂量探测仪和中性原子探测仪正样产品如图12所示。

表6 月球与深空探测任务科学载荷国际合作情况
Table 6 International cooperation on scientific payloads of lunar and deep space missions

| 任务 | 载荷 | 合作单位 | 太阳系边际探测相关载荷 |
|-----------|--------------|---------|-------------|
| “嫦娥4号”着陆器 | 月球中子与辐射剂量探测仪 | 德国基尔大学 | 高能粒子分析仪 |
| “嫦娥4号”巡视器 | 中性原子探测仪 | 瑞典空间物理所 | 中性原子探测仪 |
| “天问1号” | 火星离子与中性粒子分析仪 | 瑞士伯尔尼大学 | 中性原子探测仪 |



(a) “嫦娥4号”着陆器月球中子与辐射剂量探测仪 (b) “嫦娥4号”巡视器中性原子探测仪

图12 “嫦娥4号”中与本任务相关的国际合作载荷

Fig. 12 International payloads related to this mission on Chang'E-4

太阳系边际探测是国际大科学工程的重要平台之一，国际合作是“好”“快”“省”地实施探测活动的重要手段^[10]，在科学载荷方面可以继续开展国际合作。

德国基尔大学、瑞典空间物理、瑞士伯尔尼大学在高能粒子和中性原子探测载荷研制和科学研究方面均处于国际领先水平，基于已有的良好合作基础，可在太阳系边际探测项目的高能粒子分析仪和中性原子探测仪方面继续开展合作。

德国斯图加特大学曾负责或参与多个型号的尘埃探测器（如CASSINI、Europa Clipper、DESTINY+等）。中方与斯图加特大学在“嫦娥4号”国际载荷论证阶段联合开展了月尘分析仪的论证，并共同论证了国内其它相关任务的尘埃探测器，具有较好的合作基础。太阳系边际探测项目的尘埃粒子分析仪可与斯图加特大学继续开展合作。

5 结论

太阳系边际探测任务是我国深空探测领域又一宏伟的任务，科学载荷及其性能指标的优化配置可使得该任务的科学产出最大化。针对该任务的科学目标提

出的场、粒子和光学科学载荷配置合理,性能指标满足科学探测需求。

在任务初步工程条件约束下,载荷的重量和功耗等工程需求合理,载荷具有较好的技术基础和继承性,具有较强的工程可实现性。各载荷的特定关键技术正在开展攻关,预计2020年完成地面验证,可满足性能及进度要求。小型化和低功耗、高可靠和长寿命、科学数据处理和压缩等共性关键技术还需开展深入研究,并完成攻关和验证。

基于月球与深空探测领域的科学载荷方面已有的国际合作,可针对部分载荷继续开展国际合作。

参 考 文 献

- [1] GUO Y P, FARQUHAR R W. New horizons mission design[J]. *Space Science Review*, 2008, 140: 49-74.
- [2] WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, MCNUTT R L, the IHP/HEX Team. The interstellar heliopause probe: heliospheric boundary explorer mission to the interstellar medium[J]. *Earth Moon and Planets*, 2009, 104: 17-24.
- [3] MCNUTT R L, INNOVATIVE INTERSTELLAR EXPLORER TEAM. Innovative interstellar explorer[C]//Workshop on Innovative System Concepts ESTEC. Noordwijk, The Netherlands: [s. n], 2006.
- [4] 甘晓. 2049年实现太阳系边际探测[N]. *中国科学报*, 2018-10-31(1).
- [5] DYAL P. Pioneers 10 and 11 deep space missions[J]. *COSPAR Colloquia Series*, 1990(1): 373-382.
- [6] RUDD R P, HALL J C, SPRADLIN G L. The voyager interstellar mission[J]. *Acta Astronautica*, 1997, 40: 383-396.
- [7] WEAVER H A, GIBSON W C, TAYLEY M B, et al. Overview of the new horizons science payload[J]. *Space Science Review*, 2008, 140: 75-91.
- [8] GRUNTMAN M. Instrumentation for interstellar exploration[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(1): 204-212.
- [9] MEWALDT R A, LIEWER P C, INTERSTELLAR PROBE SCIENCE AND TECHNOLOGY DEFINITION TEAM. Scientific payload for and interstellar probe mission[J]. *COSPAR Colloquia Series*, 2001(11): 451-464.
- [10] 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]. *Science China Information Sciences*, 2019, 49(1): 1-16.
- [11] ZHANG H Y, WANG Y, CHENG L P, et al. In-situ lunar dust deposition amount induced by lander landing in Chang'E-3 mission[J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(3): 520-527.
- [12] 王玲华, 宗秋刚, 任杰. 太阳系边际的能量粒子探测[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(6): 566-572.
WANG L H, ZONG Q G, REN J. Detection of Energetic Particles in the Outer Heliosphere and its Boundaries[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(6): 566-572.

作者简介:

张爱兵(1977-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:空间环境探测及研究。

通讯地址:北京市海淀区中关村南二条1号(100190)

电话:(010)62582827

E-mail: zhab@nssc.ac.cn

Scientific Payloads Proposal for Chinese Solar System Boundary Exploration Mission

ZHANG Aibing^{1,2,3,4}, LI Hui^{1,5}, KONG Linggao^{1,2,3}, ZHANG Shenyi^{1,2,3,4}, FU Liping^{1,2,3},
XUE Hongbo^{1,5}, YANG Jianfeng⁶, HE Zhiping⁷, WANG Linghua⁸, LI Yanwei⁹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Science and Technology on Space Environment Situational Awareness, Beijing 100190, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

6. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian 710119, China;

7. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

8. Peking University, Beijing 100871, China; 9. University of Stuttgart, Stuttgart 70569, Germany)

Abstract: In view of the scientific objectives of Chinese Solar System Boundary Exploration Mission which is being under discussion, 10 scientific payloads for field, particle and optics are proposed. The payloads performance requirements and engineering requirements such as mass and power are given. The high performance and tight schedule are both taken into consideration for the payloads schemes taking the technical advantages from several Chinese institutions. The development of payloads has good technical basis and inheritability. For this super far away exploration, preliminary solutions to common key technologies such as miniaturization and low power, high reliability and long lifetime, science data processing and compression for payloads are given. The payloads are mainly developed domestically, well international cooperation according to the previous successful collaboration is to play a bigger role.

Keywords: Solar system boundary exploration; scientific payloads; miniaturization of payloads

Highlights:

- The payloads proposal meets the scientific objectives of Chinese Solar system boundary exploration mission
- Technology foundations and heritage are good for the payloads.
- International cooperation are recommended for some payloads.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：朱恬]