DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2021.03.001

高震宇[1]　王民建[2]　黄帆[2]　宋爱国[1]　朱利丰[1]

深空探测科学仪器研究进展

摘要

深空探测是对宇宙中地球以外的行星、卫星、小行星和彗星等星体或空间环境的探测活动.合理选择深空探测科学仪器,了解被测星体的物理及化学性质、地表地貌、动态特性以及有机物和水的存在,对人类了解地外水和生命信息、认识太阳系的起源和演化有着重要意义,是深空探测的重要任务.本文总结了深空探测的科学目标,介绍了近 50 年来典型深空探测任务中探测器所搭载的科学仪器及其特点,包括质谱仪、光谱仪、探地雷达和磁力计等,整理了其性能参数及面向的探测功能任务,最后讨论了深空探测科学仪器目前呈现出的小型化、低功耗、更强的环境适应能力和多仪器联合使用的发展趋势.

关键词

深空探测;有效载荷;质谱仪;光谱仪;探地雷达;磁力计

中图分类号 V447+.1

文献标志码 A

收稿日期 2021-05-08

资助项目 空间科学联合创新中心(上海航天)创新基金资助项目

作者简介

高震宇,男,硕士生,主要研究方向为移动机器人.gaozhenyu@ seu.edu.cn

宋爱国(通信作者),男,博士,教授,主要研究方向为空间机器人、遥操作技术、人机交互等.a.g.song@ seu.edu.cn

1　东南大学 仪器科学与工程学院,南京,210096

2　上海卫星工程研究所,上海,201109

0　引言

深空探测指人类对地球以外较远的天体或空间环境开展的探测活动,人类通过对宇宙中的行星、卫星、小行星和彗星等星体或空间环境进行接近与探测,可以了解被测星体的物理及化学性质、地表地貌、动态特性以及有机物和水的存在,对人类了解地外水和生命信息、认识太阳系的起源和演化有着重要意义,为人类走出地球提供了更多的信息准备,是当前和未来航天领域的发展重点之一.

美国、苏联(俄罗斯)、欧洲航天局在现代深空探测领域起步较早,开展了多次重要探测任务并取得了瞩目成果.我国深空探测起步较晚,但近些年进步巨大,在月球和火星探测方面成果突出.深空探测任务主要集中于月球、行星、彗星以及小行星.自 1959 年起,苏联和美国分别发射多台探测器探测月球.离地球较近的火星是深空探测的热门目标.20 世纪 60 年代苏联迈出探索火星第一步,随后美国对火星进行了多次探测,先后实施了火星探测漫游者计划、火星实验室计划以及 2020 年火星探测计划等.1978 年后,美国和欧洲航天局对彗星展开了多次探测,包括国际彗星探测器(International Cometary Explorer, ICE)、星尘号(Stardust)探测器、深空 1 号(Deep Space 1)探测器以及罗塞塔彗星探测计划.典型的小行星探测器有深空 1 号、黎明号,以及目前仍在探测中的 OSIRIS-Rex 探测器.

为实现对天体表面信息的探测,深空探测器除了需要完备的动力系统、定位系统、通信系统等模块以辅助探测器移动接近地球以外较远的天体,还需要搭载不同的科学仪器来实现对天体的物理性质、化学成分等信息进行分析与探测.本文将围绕深空探测任务,讨论深空探测中的科学仪器研究进展.针对地外星球的通性,为辅助深空探测科学仪器的设计和选型提供依据,总结深空探测的基本科学目标,主要探测和研究地外星球的物理及化学性质、物质组成、地表地貌、动态特性,以及离子与磁场环境等.根据探测的任务或原理的不同,结合近 50 年来典型的深空探测任务,对常用的仪器包括光谱仪、质谱仪、探地雷达、磁通门磁力计、离子环境探测仪器、无线电探测仪器和尘埃探测仪器等科学探测仪器的研究进展情况进行进一步的分类介绍.随着探测技术的进步,深空探测科学仪器逐渐向小型化和低功耗的方向发展,更加注重仪器的环境适应能力以及多仪器的联合使用.最后具体讨论了科学探测仪器的发展趋势并对未来的科学仪器载荷做出设想.

1 深空探测的科学目标

深空探测主要集中于月球、行星、小行星以及彗星.依据近50年来深空探测计划以及不同星体的共同特性,总结出深空探测主要的科学目标有:

1)探测星体的物理性质:包括大小、形状、反照率、重力、孔隙度和热惯量等参数.

2)探测星体的化学元素、同位素组成和有机物成分.

3)探测星体的地表和内部的地貌、地质构造特征和组成成分:通过比较不同天体在地质学和矿物学上的异同以及星体地表不同区域矿物差异可以帮助我们对于星体的分类、形成和演化有进一步的理解.随着对星体表面认识的进步,逐渐将探测内容转入地表以下的地质构造、水冰含量以及介电常数等信息的探测.

4)确定星体的动态特性及其产生机制:典型的动态现象包括彗星彗发的形成和演化、彗核的分裂以及火星的沙尘风暴等.

5)探测星体的离子与磁场环境.

6)探索地外星球与地球的关系:在太阳系形成初期,彗星或小行星经常撞击地球,带来大量的水和挥发物,对海洋、大气乃至生命的形成与演化有着重要影响.

7)研究太阳系的起源和演化:长期处于低温状态下的彗星等地外星体,内部的演化程度小,保留了较多的太阳系形成初期的原始尘埃和凝聚物,是探索太阳系的形成和演化过程的重要线索.

2 典型深空探测任务的科学探测仪器配置

我国21世纪前期的深空探测主要集中于探月工程,成功实现月球的环绕、巡视探测和月壤的采样返回.2020年我国实施首次火星探测任务,并将对火星采样、小行星探测、木星系及行星穿越探测等多种技术进行攻关[1].美国和欧洲的探测任务以行星和彗星探测为主,起步早、探测范围广且成果瞩目,包括火星漫游者探测计划、对丘留莫夫-格拉西缅科(67P)彗星探测的罗塞塔计划以及正在进行中的美国火星2020探测计划.本部分将总结典型深空探测任务的科学仪器配置.

2.1 深空探测光谱仪

深空探测任务都配有光学载荷,对目标星体的有机物成分、矿物和岩石成分、元素组成和形态特征等进行研究.按照科学目标可将光学仪器分为成像探测类和光谱分析类.成像探测类以各类型相机为主,负责拍摄被测星体的照片,为科学研究提供直观认知.光谱分析类通过光谱仪器研究物质组成成分、演化以及结构等.根据光谱仪技术、探测范围和原理的不同,光谱仪可分为可见/红外成像光谱仪、激光诱导击穿光谱仪、拉曼光谱仪、X射线荧光/衍射光谱仪和紫外光谱仪等[2].

1)可见/红外成像光谱仪

可见/红外成像光谱仪光谱范围宽,具有高空间分辨率和高光谱分辨率的特性,广泛应用于深空探测任务中,判断星体的矿物、岩石、有机物等组分[3].罗塞塔号彗星探测任务配置了3个光谱仪,分别为罗塞塔号航天器上的光学分光与红外远程成像系统(Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System, OSIRIS)、可见光和红外热成像光谱仪(Visual and Infrared Thermal Imaging Spectrometer, VIRTIS)以及菲莱号登陆器上的红外和可见光分析器(Comet Infrared and Visible Analyser, CIVA).

OSIRIS由高空间分辨率的窄角相机和较低分辨率的广角相机构成,从较远的距离(100 km以上)观测彗核的结构、表面矿物以及尘埃的喷射[4],其实物如图1所示.OSIRIS观察到彗星表面的"鸡皮疙瘩"地貌并在近日点附近观测到直径超过1 m的彗发喷射物.VIRTIS包括0.25~5 μm范围的光谱成像通道(VIRTIS-M)和2~5 μm范围的高光谱通道(VIRTIS-H)[5],主要探测彗核表面固体、有机物和气态成分的性质[6],实物示于图2.仪器检测出彗核表面存在大量的含碳化合物、少部分的水冰及非挥发性的有机高分子物质,其中C—H和O—H成分较多而N—H成分少.较少的水冰含量表明67P彗星是一个冰土球,且诞生于太阳系较外层区域.CIVA仪器由全景立体相机(CIVA-P)和配有近红外显微高光谱成像仪的显微镜(CIVA-M)组成.CIVA-P探测毫米级到米级范围的物质[7],识别彗星地表的形态结构,如裂纹、孔隙、断层以及彗星演变过程中的侵蚀特征,实物如图3所示.CIVA-M可在13.0 mm的位置处对7 μm以上的颗粒进行红外光谱探测,实物示于图4.

2)X射线荧光/衍射光谱仪

基于X射线荧光效应以及衍射效应的探测仪器被广泛应用于深空探测中,用于分析星球表面的元素组成和岩石土壤成分.典型的仪器有α粒子X射线光谱仪(Alpha Proton X-ray Spectrometer, APXS),

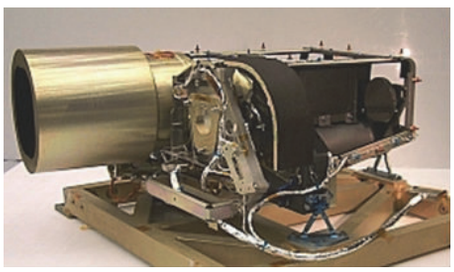


图 1　OSIRIS[4]

Fig. 1　OSIRIS[4]

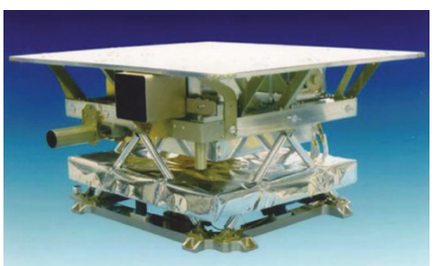


图 2　VIRTIS[5]

Fig. 2　VIRTIS[5]

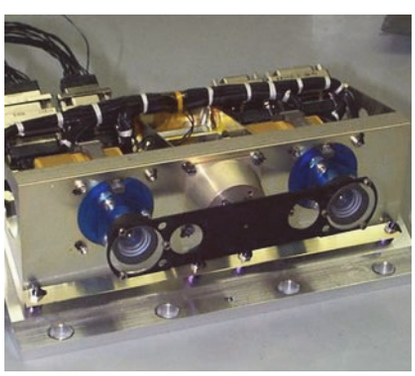


图 3　CIVA-P[7]

Fig. 3　CIVA-P[7]

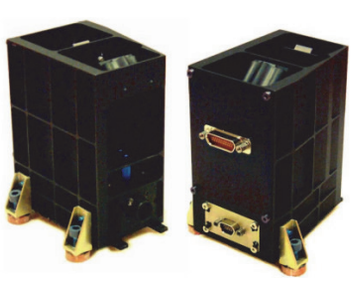


图 4　CIVA-M[7]

Fig. 4　CIVA-M[7]

实物如图 5 所示.APXS 仪器通过近距离接触分析岩石和土壤中存在的元素,提供有关地表形成、气候变化以及水活动的信息[8].1997 年美国火星探路者登陆车搭载第一台小型化低功耗的 APXS 仪器,可以探测镁、铝、硅、钾、钙、铁、钠、硼、硫、碳等元素,6.4 keV 铁元素谱线的能量分辨率为 260 eV.2003 年美国火星漫游者项目搭载了改进了的 APXS,加入 α 粒子荧光光谱仪辅助分析,6.4 keV 铁元素谱线的能量分辨率提高到 160 eV,但是仪器只能在夜间运行,且每次检测至少需要 10 h[9].2004 年发射的罗塞塔号配备的 APXS 仪器采用了硅漂移检测器,可显著提高能量分辨率,更好地分离低能 X 射线[10].

美国火星 2020 探测计划的毅力号火星车搭载了改进的 X 射线岩石化学行星仪器(Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry,PIXL).仪器实物如图 6 所示,核心是 X 射线荧光光谱仪和拍摄岩石、土壤纹理细节的特写相机,两者共同寻找火星上存在微生物的迹象[11].PIXL 的感应探头安装在火星车机械臂上,探测时放置在地面上方 2 cm 处,针对不同的地面情况和目标特征,有粗略勘探方式、线扫描模式、网格模式和点分析模式.

3)激光诱导击穿光谱仪和拉曼光谱仪

激光诱导击穿光谱仪(Laser Induced Breakdown Spectroscopy,LIBS)具有可远程分析、高效、可改变被测物体表面的优势[12].美国火星科学实验室任务的 ChemCam(Chemistry & Camera)仪器首次搭载 LIBS 研究火星土壤和岩石的化学与矿物组成,但是无法获取具体的物质成分和结构,其实物如图 7 所示.探测时机械臂上的激光发射器向 9 m 外的岩石发射激光使其蒸发,由火星车体内部的 3 台光谱仪分析,分别覆盖 240~340 nm 的紫外谱段、340~540 nm 的可见光谱段以及 540~850 nm 的近红外谱段[13].

拉曼光谱仪利用光子散射频率变化受到分子内部和分子间振动的影响确定物质种类,可识别无机物、有机物和生物组分.目前主要的拉曼光谱仪为靠近式拉曼光谱仪[14],通过移动机械臂对焦被测物体实现近距离(10 m 内)探测.美国火星 2020 探测任务中搭载的有机物与化学物质光谱仪(Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals,SHERLOC)由拉曼光谱仪、激光发射器和相机组成.激发光源发射波长为 248.6 nm,可将拉曼散射强度提高 100~10 000 倍[15],实物如图 8 所示.美国火星 2020 探测任务搭载的 SuperCam 仪器在 LIBS 的基础上增加了拉曼光谱仪.LIBS 负责探测矿物的元素种类,拉曼光谱仪负责检测有机物质和无机矿物的组分[16].

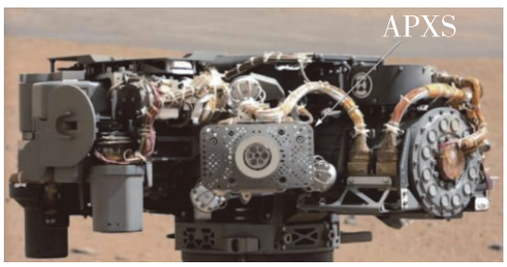


图 5　APXS[8]

Fig. 5　APXS[8]

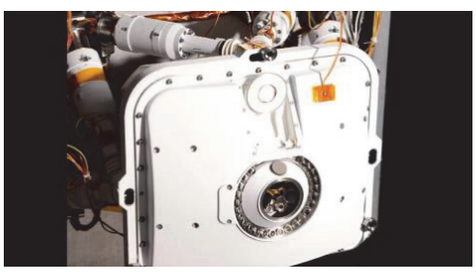


图 6　PIXL[11]

Fig. 6　PIXL[11]

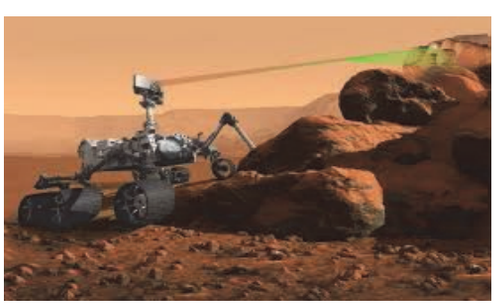


图 7　ChemCam[13]

Fig. 7　ChemCam[13]

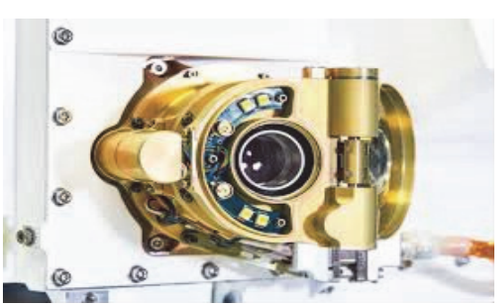


图 8　SHERLOC[15]

Fig. 8　SHERLOC[15]

4)紫外成像光谱仪

紫外谱段包含了各类星体的重要信息,如大气活动、表面的电离层与太阳风的相互作用以及碳、氢、氧、氮、硫等生命相关的元素和物质的存在.罗塞塔号配备的紫外成像光谱仪 ALICE 是一种轻型、低功耗和低成本的紫外光谱仪,用于探测彗星的远紫外和极紫外光谱,覆盖范围从 70~205 nm.ALICE 仪器发现彗核上方 1 km 内的电子是水受辐射降解产生的:来自太阳的紫外线击中水分子并将其电离,射出高能电子同时分解出氢原子和氧原子[17].

5)其他深空探测任务中的光谱仪

其他典型的光谱仪器还有:专门用于含铁矿物探测的穆斯堡尔(Mössbauer)光谱仪,但是因为其测量元素有限,应用不是很广泛[18];利用 X 射线衍射和 X 射线荧光光谱分析原理的化学与矿物学分析仪(Chemistry & Mineralogy,CheMin)[19]和 X 射线成像光谱仪(REgolith X-Ray Imaging Spectrometer,REXIS)[20];利用热辐射原理进行探测的微型热辐射光谱仪 Mini-TES[21]和热辐射光谱仪(OSIRIS-REx Thermal Emission Spectrometer,OTES)[22];黎明号可见光与红外光谱仪(Visual and Infrared Spectrometer,VIR)[23]等.这些光谱仪器的具体参数和探测目的在表 1 中列出.

2.2　深空探测质谱仪

早期的深空探测任务主要集中于获取星体图像、研究星体的地形地貌等,因此探测器搭载的仪器以光谱仪等光学仪器为主.直到 20 世纪 70 年代质谱仪才逐渐被各种探测任务采用,根据检测原理可分为:四极杆质谱仪、离子阱质谱仪和飞行时间质谱仪等.航天器上的质谱仪可以探测星体的大气、土壤吸附气体和挥发成分的元素以及同位素组成;登陆器搭载的质谱仪可以测定星球表面大气、土壤和岩石的成分等[25].

1)四极杆质谱仪

四极杆质谱仪测量物质的质荷比,质量较轻、分辨率较高、环境适应性强.典型的仪器有美国好奇号火星样本分析仪(Sample Analysis at Mars,SAM),由四极质谱仪、气相色谱仪和可调谐激光分光计组成,仪器负责搜寻火星表面的有机化合物以及与生命构成相关的轻量元素,例如氢、氧和氮等,质量检测范围为 1.5~535.5 u[26].

2)飞行时间质谱仪

飞行时间质谱仪根据离子飞行时间确定物质成分,结构简单、无需外加电场、扫描速度快且质量检测范围大.罗塞塔号彗星次级离子质量分析仪(Cometary Secondary Ion Mass Analyser,COSIMA)检测次

表 1　深空探测任务光谱仪

Table 1　Spectrometers in deep space exploration

深空探测任务	选用仪器	部分参数	探测目的
美国火星漫游者计划	穆斯堡尔(Mössbauer)光谱仪[18]	体积:检测探头 90 cm×50 cm×40 mm; 电路模块 160 cm×100 cm×25 mm 质量:0.5 kg 功耗:2 W 工作温度:检测探头-120~40 ℃; 电路模块-50~40 ℃ 激发源:^{57}Co	研究火星含铁矿物的成分和丰度
美国火星科学实验室	化学与矿物学分析仪 CheMin(X 射线衍射和荧光光谱仪)[19]	激发源:Co 衍射范围:5°~50°(2θ) 衍射分辨率:≤0.35°(2θ) CCD 有效面积:40 μm×40 μm	火星上的矿物类型和数量
近地小行星 1999 RQ36(Bennu)探测任务	X 射线成像光谱仪 REXIS[20]	质量:4.4 kg 功耗:10.8 W 焦距:20 cm CCD 有效面积:24 μm×24 μm CCD 工作温度:≤-60 ℃	小行星地表元素组成以及某些特定元素的表面分布
美国火星漫游者计划	微型热辐射光谱仪 Mini-TES(傅里叶变换红外光谱仪)[21]	体积:23.5 cm×16.3 cm×15.5 cm 质量:2.4 kg 功耗:5.6 W(使用时),0.3W(平均) 光谱范围:5~29.5 μm 采样精度:9.99 cm^{-1}	探测火星岩石和土壤的矿物学信息,判断岩石种类,寻找由水作用形成的矿物质
近地小行星 1999 RQ36(Bennu)探测任务	热辐射光谱仪 OTES[22]	体积:37.49 cm×28.91 cm×52.19 cm 质量:6.27 kg 功耗:13 W 光谱范围:5.71~100 μm 采样精度:8.66 cm^{-1}	探测小行星的矿物组成和分布;通过热辐射检测亚尔科夫斯基效应
黎明号小行星探测器(The Dawn)	可见光与红外光谱仪 VIR[23]	质量:20 kg 功耗:52 W 光谱范围:可见光 0.25~1.05 μm; 红外光 1.0~5.0 μm 光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$:可见光 100~380; 红外光 170~360 像平面工作温度:可见光 150~190K; 红外光 65~90 K	测量灶神星和谷神星表面矿物质
美国新视野号(New Horizon)	紫外成像光谱仪 Alice[24]	质量:4.5 kg 功耗:4.4 W 光谱范围:70~205 μm 探测器有效面积:35 mm×20 mm	探测冥王星和太阳系边界

级离子飞行时间,质量范围为 1~3 500 u,分辨率($m/\Delta m$)>2 000[27],实物如图 9 所示.COSIMA 仪器发现 67P 彗星尘埃颗粒中并不含冰,这表明彗发中的尘埃颗粒是彗星经过近日点后慢慢集聚到彗星表面的.此外 COSIMA 在尘埃颗粒中发现了大量的钠离子以及镁、铝、铁、钙等元素和复杂含碳有机物.

罗塞塔号离子与中性分子分析仪(Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis, ROSINA)对彗星大气和电离层所含元素、同位素和分子成分进行分析,由双聚焦磁场质谱仪(Double Focusing Mass Spectrometer,DFMS)和反射式飞行时间质谱仪(Reflection Time of Flight,RTOF)组成[28],实物示于图 10.DFMS 检测的质量范围为 12~150 u,分辨率高($m/\Delta m$=3 000)且动态范围较大.RTOF 作为 DFMS 仪器的补充,将质量检测范围扩大至 1~350 u,保证在较大的质量范围内仍有较高灵敏度($m/\Delta m$>500).两个质谱仪各有一个气体检测通道和一个离子检测通道[28].ROSINA 仪器的主要探测到彗星存在一氧化碳、二氧化碳、氮气、氩气、氧气和含氮、硫有机物,并发现彗星上水的氘氢比与地球显著不同,排除地球水来源于彗星的可能性.

菲莱号彗星采样与样本成分分析设备(Cometary Sampling and Composition,COSAC)测量彗星表面和地下产生的挥发性物质的元素、同位素组成并识别化学和矿物成分.如图 11 所示,仪器由一个气相色谱仪和一个高分辨率多通道的飞行时间测量质谱仪组成[29].COSAC 分析了登陆器采集到的样品,发现彗核表面主要是由含冰量少的挥发性尘埃

颗粒组成,共有 16 种富含碳和氮的有机化合物,包括 4 种在彗星中从未发现过的物质:异氰酸甲酯、丙酮、丙醛和乙酰胺.

3)离子阱质谱仪

离子阱质谱仪具有结构小巧、质量轻的特点,多出现在气相色谱-质谱联用的场合.菲莱号稳定同位素探测仪 Ptolemy 由气相色谱仪和离子阱质谱仪组成,质量检测范围为 12~150 u[30].Ptolemy 通过加热固体样本或直接采集气体检测挥发性物质并对碳、氢、氧、氮的同位素进行分析[31],实物示于图 12.Ptolemy 检测出了彗发气体的主要成分为水蒸气、一氧化碳、二氧化碳以及少量含碳的有机化合物,包括甲醛等.Ptolemy 和 COSAC 共同检测到了与生命构成相关的含碳氮有机物成分,包括氨基酸、糖和碱基,这为探索地球的生命起源提供了新的线索.

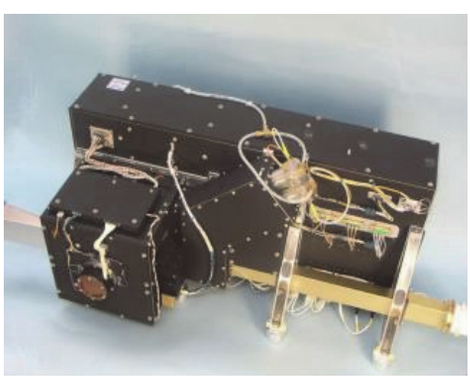


图 9 COSIMA[27]

Fig. 9 COSIMA[27]

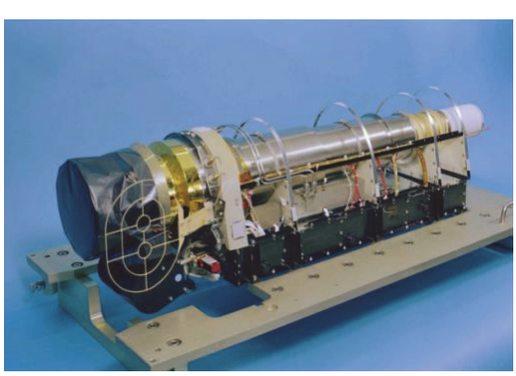


图 10 ROSINA[28]

Fig. 10 ROSINA[28]

4)其他深空探测任务中的质谱仪

磁质谱仪和离子中性质谱仪也常见于各种深空探测任务中.带电离子在磁质谱仪的磁场内受到不同的洛伦兹力后分离,以此区分离子种类;离子中性



图 11 COSAC[29]

Fig. 11 COSAC[29]

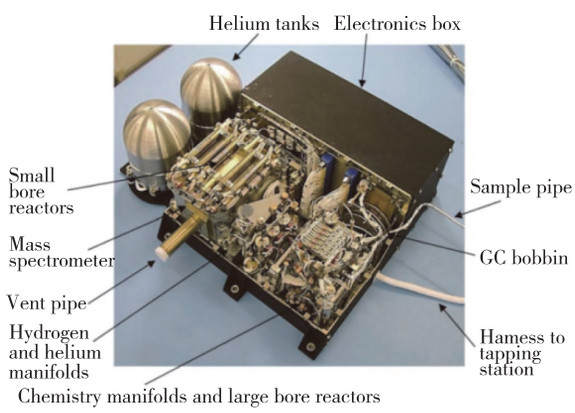


图 12 Ptolemy[30]

Fig. 12 Ptolemy[30]

质谱仪通常是以四极杆质谱仪为质量检测器的探测仪器.其他深空探测任务的质谱仪参数和探测目标如表 2 所示[32].

2.3 探地雷达

早期探测任务将雷达搭载在环绕器上,从较近距离对待测星体的浅表层和次表层实现全方位探测.典型的有欧洲航天局火星快车搭载的火星次表层和电离层探测先进雷达(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding,MARSIS)、我国“嫦娥三号”搭载的测月雷达和美国航空航天局火星勘测轨道器搭载的浅表层雷达(Shallow Radar,SHARAD)[40].随着对地外星球认知的深入,逐渐以就位探测方式为主,在登陆器上搭载探地雷达,通过雷达波极化方式的变化获取星体地表以下的地质结构、水冰土壤分布和介电常数等信息.我国“玉兔号”月球探测器搭载了一部探月雷达,分为两个通道:通道一分辨率为米级,探测深度大于 100 m;通道二分辨率可达到 30 cm,探测深度小于 30 m[41].美国 2020

表 2　深空探测任务质谱仪

Table 2　Mass spectrometers in deep space exploration

深空探测任务	选用仪器	部分参数	探测目的
阿波罗 15 号	扇形磁场质谱仪[33]	体积:30 cm×32 cm×23 cm 质量:11 kg 检测范围:12~66 u	探测月球大气成分和分布情况
美国新视野号探测器	高能离子质谱仪 PEPSSI(飞行时间质谱仪和固态硅检测器)[34]	体积:直径 7.6 cm,厚度 2.5 cm 质量:1.5 kg 功耗:2.5 W 检测范围:能量高达 1 MeV 的粒子	探测冥王星中性大气层和电离层特性,冥王星和卡戎的高能粒子环境
美国星尘号探测器	彗星和星际尘埃分析器 CIDA(飞行时间质谱仪)[35]	质量:13.2 kg 功耗:13 W 检测范围:1~150 u	探测木星大气的同位素成分和物理性质
美国海盗号探测器	气相色谱-双聚焦磁偏转质谱仪[36]	体积:27.5 cm×33 cm×25 cm 质量:10.4 kg 检测范围:1~230 u	检测火星大气、土壤和有机物
金星先驱者号探测器	双曲面四极质谱仪[37]	体积:四极杆半径 0.2 cm,长 7.5 cm 质量:3.81 kg 平均功耗:12 W 质量检测范围:1~64 u	探测金星大气中一氧化碳、二氧化碳、氮气等
	磁偏转质谱仪[37]	质量:3 kg 平均功耗:1.5 W 质量检测范围:通道一 1~16 u; 通道二 15~208 u	
土卫六惠更斯号探测器	气相色谱仪与四极杆质谱仪联用[38]	体积:直径 198 mm,高度 470 mm 质量:17.3 kg 功耗:28 W 检测范围:2~141 u	探测土卫六从地表到 176 km 高空的大气组成
土星卡西尼号探测器	离子和中性粒子质谱仪(四极杆质谱仪)[39]	体积:20.3 cm×42.2 cm×36.5 cm 质量:10.28 kg 功耗:中性粒子模式 23.3 W; 离子模式 20.9 W 检测范围:中性粒子 1~8 u; 离子 12~99 u	探测土星附近离子和中性粒子

火星探测计划选用的火星地下实验的雷达成像仪(Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment,RIMFAX)是首个探测火星浅层地表的仪器,实物示于图 13.RIMFAX 的首要目标是获取火星地表结构的图像,并提供有关地表组成成分的信息[42].雷达工作频率范围是 150 GHz 到 1.2 GHz,每发射一次电磁波需要 100 ms,在自由空间的垂直分辨率可达到 14.2 cm.探测时火星车每前进 10 cm,RIMFAX 就会进行一次浅层深层交替测量,预期的信号的穿透深度可达 10 m.我国"天问一号"火星任务的轨道器和巡视器各搭载了一部探测雷达共同研究火星土壤层和冰层的结构,分辨率可到米级至毫米级[43].

2.4　磁通门磁力计

太阳系星体周边的磁场主要来源可以分为:行星内核驱动电流产生的主磁场、星体内层物质的剩余磁场、太阳风与星体作用产生的外源场和外源场在导电行星内产生的感应磁场.搭载磁通门磁强计可以充分了解地外星球的磁场信息以及太阳系形成初期小粒子组合成各类行星、卫星和彗星的过程.罗塞塔号装配磁力计和离子检测仪器(Rosetta Magnetometer and Plasma Monitor,ROMAP)和离子联合探测仪器(Rosetta Plasma Consortium,RPC)都带有磁通门磁力计,测量彗星本身的磁场和太阳风作用下产生的磁场.两个仪器探测发现 67P 彗核本身几乎没有磁场(小于 0.9 nT),还观察到彗星的逃逸大气与太阳风相互作用形成了一个电磁空腔[44-45].我国"天问一号"火星探测车和环绕器都装载了磁力计探测火星表面磁场强度[46],其中火星车搭载磁力计可探测范围为±65 000 nT,分辨率为 0.01 nT.ROMAP 仪器的磁力计实物如图 14 所示[45].

2.5　离子环境探测仪器

太阳风将太阳的磁场带到整个太阳系中,与各类星体相互作用形成了特殊的动态特性,如彗星表层挥发物喷发后受到太阳风照射电离构成彗星的离子彗尾.探测地外星球的离子环境可以揭示太阳风的作用机制,了解星球的离子环境变化规律.罗塞塔

号的 RPC 仪器除了负责探测彗星磁场,另一个主要任务是探测彗星的离子环境,包括离子的速度、质量、密度、温度,监视彗核中的尘埃和气体活动以及观察彗发各分层的形成.RPC 在 67P 彗星上测到了弓形波形成的迹象,并发现彗星离子与太阳风的相互作用是产生电磁空腔的主要因素.

2.6 无线电探测仪器

通过提取无线电通信发射器和接收器(被测星体、地球、登陆器等)之间的信号扰动,可以获取各类星体的大小、重力、表面形态、内部结构等物理性质.该类探测使用通信天线,不需要额外搭载探测仪器,在深空探测任务中应用广泛.我国“嫦娥”探月项目运用无线电探测科学探测了月球的重力场.欧洲航天局的火星快车和金星快车探测任务在掩星阶段探测了火星与金星的大气和电离层[47].罗塞塔号无线电科学实验(Rosetta Radio Science Investigations,RSI)对 67P 彗星的重力场、惯性和运行轨道等进行研究[48].罗塞塔探测任务还选配了无线电波传输探测彗核实验仪器(Comet Nucleus Sounding Experiment by Radiowave Transmission,CONSERT),分别搭载在航天器和登陆器上.实验仪器测量发送和接收信号之间的时间差,确定彗核的平均介电特性,进一步建模可对彗核的组成成分和孔隙度有初步认知并识别彗星内部的块状、间隙或者空隙区域.CONSERT 仪器选用宽叶天线,轨道器的天线示于图 15,在自由空间中的分辨率为 30 m,在彗星上的分辨率为 20 m[49].RSI 和 CONSERT 仪器研究表明 67P 彗星“头部”的孔隙率约为 75%~85%,高孔隙率表明 67P 彗星的形成是一个相对平缓的过程,许多小彗星以不到 1 m/s 的速度下降结合在一起.

2.7 尘埃探测仪器

月球尘埃的存在会干扰光学设备的视野、附着于仪器表面产生污染、影响光电阵列和散热器的工作.火星尘埃会影响电池的输出功率和仪器的正常工作[50].彗星的尘埃主要来源于彗核表面附着的挥发物喷发,对认识彗发现象和形成机制有着重要的意义.罗塞塔号搭载颗粒冲击分析仪和集尘器(Grain Impact Analyser and Dust Accumulator,GIADA)和显微成像灰尘分析系统(Micro-Imaging Dust Analysis System,MIDAS).GIADA 研究彗星尘埃颗粒的物理特性、化学特性以及动态演化的过程,发现彗发的尘埃颗粒可分为直径 0.03~1 mm 内的紧凑颗粒和直径 0.2~2.5 mm 之间的较大的蓬松聚集体[51].MIDAS 仪器配有 61 个尘埃采集表面,使用原子力显微镜获取尘埃的纹理、形状、大小和通量等信息,精度可达毫米甚至微米级[52],实物示于图 16.美国国家航天局的星尘号彗星探测航天器搭载星尘样本收集器(Stardust Sample Collection,SSC)收集 WILD2 彗星的尘埃颗粒,尘埃通量检测仪器(Dust Flux Monitor Instrument,DFMI)负责记录尘埃颗粒的数量、质量以及飞越彗星过程中的撞击率,了解尘埃喷发形成彗发的物理过程,它还负责研究尘埃颗粒对航天器以及搭载仪器的干扰[53].

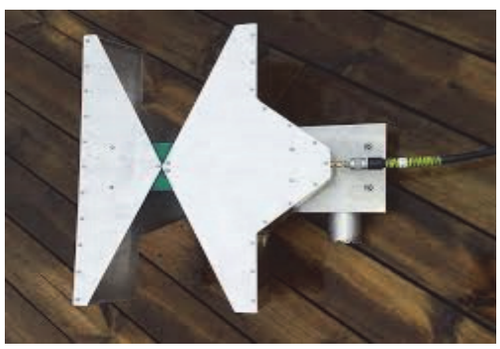


图 13 RIMFAX[42]

Fig. 13 RIMFAX antenna[42]

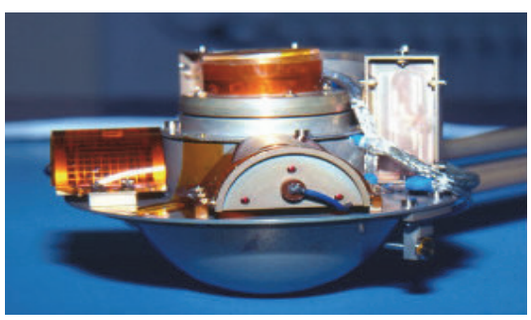


图 14 磁通门磁力计[45]

Fig. 14 Fluxgate magnetometer[45]



图 15 CONSERT 轨道器天线[49]

Fig. 15 CONSERT orbiter antenna[49]

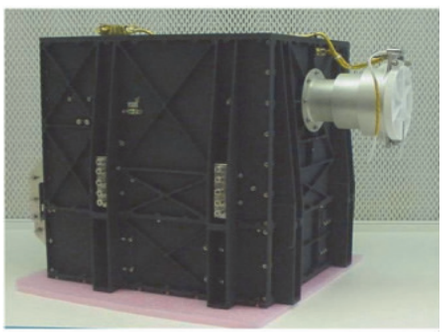


图 16 MIDAS[52]

Fig. 16 MIDAS[52]

3 深空探测科学仪器的发展趋势

最初的深空探测载荷仅有光学仪器,到 20 世纪 70 年代质谱仪加入到了探测任务中.随着科技的进步和探测要求的提高,更多类型的载荷投入使用.为提高探测效果,科学载荷仪器的发展趋势集中于小型化、提升环境适应能力和多仪器联合使用等方面.

3.1 小型化和低功耗

出于节省空间、降低功耗和燃料的考虑,深空探测的科学仪器应尽量满足小型化、低功耗和高集成度的要求.由于技术进步,质谱仪的小型化程度已经很高,大部分质量可控制在 10 kg 左右.装载在星体环绕器上的光谱仪为了获取高分辨率的图像,存在质量大、体积大的缺点,相比之下登陆器上的光谱仪质量一般不超过 10 kg,功耗在 10 W 左右,但是含有激光发射器的光谱仪器功耗都在 20 W 以上.探地雷达、磁通门磁力计等仪器都能满足小型化和低功耗的要求:RIMFAX[42]质量为 3 kg,功率 5~10 W,体积为 196 mm×120 mm×66 mm;“天问一号”火星探测车磁力计的传感器质量为 86 g、电路元件质量为 628.9 g,工作时功率为 5.48 W.

3.2 环境适应能力更强

深空探测航天器和登陆器一般都处于恶劣环境下,仪器受到干扰多,需要具有足够的环境适应能力.有些星体如火星大气稀薄、昼夜交替过快导致星球表面昼夜温差较大,而彗星等星体长期处于低温下且地表存在永久阴影区.在这些环境下仪器会出现运行不可靠的问题,例如美国火星漫游者仪器发热导致 APXS 只能在夜间检测,极大地降低了探测效率.因此探测仪器的热管理能力非常重要,加入珀耳帖效应冷却器或者热控元件可以有效解决仪器过热产生的问题,如 VIRTIS[5]仪器配备低温冷却器用于冷却红外探测器.

尘埃颗粒对航天器以及搭载仪器的干扰不可忽略,如美国火星漫游者的 APXS 仪器因受尘埃干扰未能准确探测出火星表面的岩石和矿物成分.可使用尘埃探测仪器确定星体尘埃的物理特性,如撞击率、速度、尺寸、质量和流量等并研究尘埃对航天器和各种实验仪器的干扰.另外可以配备加热装置,从仪器表面去除挥发性的尘埃物质.

太阳光过强会影响成像仪器的成像清晰度和光谱仪器的探测性能.合理选择光谱仪覆盖的波段和成像距离可以尽量避免太阳光的影响,例如 SHERLOC[15]设定工作距离为 48 mm,可以尽量避免荧光和太阳光的干扰.星球表面光照较弱或存在永久阴影区也会造成仪器探测失败,而雷达的穿透能力强且不受光照限制,可实现阴影区的探测.

其他的环境适应手段包括在仪器外层放置覆盖罩,防止电磁辐射干扰,如勇气号火星探测车的穆斯堡尔光谱仪[18]、OSIRIS-Rex 探测器[22]的风化层 X 射线成像光谱仪和黎明号小行星探测器的可见光与红外光谱仪.探测器还可搭载压力表测量周围区域的气流速率和气体密度,压力过高时发出预警.

3.3 多仪器联合使用

随着对地外星球认识的深入,深空探测任务的复杂度也逐渐提高,多仪器联合使用可以节约空间、扩大探测范围、提升探测效果.多级质谱仪联用或气相色谱-质谱联用仪具有选择性强以及质量检测范围广的优点,而某些质谱仪也承担了分析尘埃颗粒的功能,包括罗塞塔号的 COSIMA 和星尘号的彗星星际尘埃分析仪(Cometary and Interstellar Dust Analyzer,CIDA)[35].此外,离子探测仪器可以搭配质谱仪进行联合分析,如深空一号的行星探测等离子体实验仪器(Plasma Experiment for Planetary Exploration,PEPE),核心是一台飞行时间质谱仪,测量离子和电子的能量、方向以及通量[54].

光谱仪联用的典型范例是 LIBS 与拉曼光谱仪的结合,具有远距离探测、可改变环境、特异性好等优点,将原子层面的元素探测和分子层面的物质检测结合,是探测星体表面有机物、矿物、岩石和土壤组成成分的重要仪器.美国 2020 火星探测计划和欧洲航天局的 ExoMars 探测项目计划都搭载了激光拉曼光谱仪,寻找火星生命存在的证据.

探地雷达可以获得有关星体的形成、地质结构、

水冰分布、有机物分布等信息,弥补此前深空探测任务对于星体地表以下研究的不足;中子谱仪可获取星体地表以下水冰含量和分布,进一步推断含水矿物的含量与深度分布;无线电探测仪器可以识别星体内部的孔隙结构.将这 3 种仪器联合,开展地外星球探测,将会获得更加完善的地表地层与水冰分布的信息.此外,各类星球在太阳风的作用下,磁场和离子环境有着密切的关联性,因此离子探测仪器可与磁场探测仪器联合使用,更加全面地获取地外星球的磁场、离子环境以及它们的动态特性,进一步了解太阳风的运行机制.

4 总结

基于现阶段深空探测的技术水平和探测能力,深空探测科学仪器主要是以光谱仪、质谱仪、探地雷达、磁通门磁力计、离子环境探测仪器、无线电探测仪器和尘埃探测仪器为主,负责对地外星球的物理性质、化学组成、有机物成分、地形地貌、离子与磁场环境等进行全面探测,研究地外星球与地球的关系以及太阳系的起源和演化.基于以往深空探测经验,所有探测仪器在设计时都要对小型化、集成化、抗干扰等方面进行考虑.深空探测有效载荷配置时应考虑多仪器的联合探测,保证探测仪器能相互补充、取长补短,对太阳系和更远范围的宇宙空间进行全面探测.

参考文献

References

[1] 中华人民共和国国务院新闻办公室.《2016 中国的航天》白皮书[J].中国航天,2017(1):10-17
The State Council Information Office of the People's Republic of China. White paper on China's space activities in 2016[J].Aerospace China,2017(1):10-17

[2] 周峰,郑国宪,苏云.国外深空探测光学遥感载荷发展现状与启示[J].航天返回与遥感,2012,33(1):16-22
ZHOU Feng,ZHENG Guoxian,SU Yun. Development of optical remote sensors of deep space exploration abroad and its enlightenment[J].Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2012,33(1):16-22

[3] 马庆军,王建宇,舒嵘.红外光谱仪在深空探测领域的发展状况[J].红外,2005,26(7):1-7
MA Qingjun,WANG Jianyu,SHU Rong. Development of infrared spectrometer in deep space exploration[J].Infrared,2005,26(7):1-7

[4] Keller H U, Barbieri C, Lamy P, et al. OSIRIS-the scientific camera system onboard Rosetta[J].Space Science Reviews,2007,128(1/2/3/4):433-506

[5] Coradini A,Capaccioni F,Capria M T,et al.Virtis:an imaging spectrometer for the Rosetta mission[J].Space Science Reviews,2007,128(12/3/4):529-559

[6] Reininger F M,Coradini A,Capaccioni F,et al.VIRTIS, visible infrared thermal imaging spectrometer for the ROSETTA mission[C]//International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 1995. DOI: 10.1109/IGARSS.1995.521822

[7] Bibring J P, Lamy P, Langevin Y, et al. CIVA[M]// Rosetta. ESA's mission to the origin of the solar system. Springer,2009:617-631

[8] 张剑锋,颜则东,郭云,等.国外深空探测用 α 粒子/X 射线荧光光谱仪技术发展[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论文集.杭州,2012:311-316
ZHANG Jianfeng,YAN Zedong,GUO Yun,et al.The development of α particle/X-ray fluorescence spectrometer technology[C]// The 9th Annual Conference of Deep Space Exploration Technology Committee of Chinese Society of Astronautics.Hangzhou,2012:311-316

[9] Gellert R,Rieder R,Brückner J,et al.Alpha particle X-ray spectrometer (APXS):results from Gusev crater and calibration report[J].Journal of Geophysical Research:Planets,2006,111(E2):E02S05

[10] Klingelhöfer G,Brückner J,D'uston C,et al.The Rosetta alpha particle X-ray spectrometer (APXS)[J].Space Science Reviews,2007,128(1/2/3/4):383-396

[11] Allwood A,Clark B,Flannery D,et al.Texture-specific elemental analysis of rocks and soils with PIXL:the planetary instrument for X-ray lithochemistry on Mars 2020[C]//2015 IEEE Aerospace Conference.March 7-14,2015,Big Sky,MT,USA.IEEE,2015:1-13

[12] 薛彬,刘生润,杨建峰.用于火星表面生命信息探测的激光拉曼技术进展[J].深空探测学报,2019,6(5):503-512
XUE Bin,LIU Shengrun,YANG Jianfeng. Advancements in detection of life information on Mars with Raman laser spectroscopy[J]. Journal of Deep Space Exploration,2019,6(5):503-512

[13] Maurice S,Wiens R C,Saccoccio M,et al.The ChemCam instrument suite on the Mars science laboratory (MSL) rover:science objectives and mast unit description[J].Space Science Reviews,2012,170(1/2/3/4):95-166

[14] 刘鑫,薛晨阳,熊继军,等.微型远程拉曼在深空探测中应用的可行性研究[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第五届学术年会论文集.长沙,2008:190-194
LIU Xin, XUE Chenyang, XIONG Jijun, et al. The feasibility study of micro-remote Raman in the spatial exploration[C]// The 5th Annual Conference of Deep Space Exploration Technology Committee of Chinese Society of Astronautics.Changsha,2008:190-194

[15] Beegle L,Bhartia R,White M,et al.SHERLOC:scanning habitable environments with Raman & luminescence for organics & chemicals[C]//2015 IEEE Aerospace Conference.March 7-14,2015,Big Sky,MT,USA.IEEE,2015:1-11

[16] Wiens R C,Maurice S,Mccabe K,et al.The SuperCam remote sensing instrument suite for Mars 2020[C]//47th

Lunar & Planetary Science Conference. March 21-25, 2016, The Woodlands, Texas, USA. 2016:1322
[17] Stern S A, Slater D C, Gibson W, et al. Alice: an ultraviolet imaging spectrometer for the Rosetta orbiter [J]. Advances in Space Research, 1998, 21(11): 1517-1525
[18] Klingelhöfer G, Morris R V, Bernhardt B, et al. Jarosite and hematite at meridiani planum from opportunity's mössbauer spectrometer[J]. Science, 2004, 306(5702): 1740-1745
[19] Blake D, Vaniman D, Achilles C, et al. Characterization and calibration of the CheMin mineralogical instrument on Mars science laboratory[J]. Space Science Reviews, 2012, 170(1/2/3/4): 341-399
[20] Allen B, Grindlay J, Hong J, et al. The regolith X-ray imaging spectrometer (REXIS) for OSIRIS-REx: identifying regional elemental enrichment on asteroids[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2013. DOI: 10.1117/12.2041715
[21] Silverman S, Peralta R, Christensen P, et al. Miniature thermal emission spectrometer for the Mars exploration rover[J]. Acta Astronautica, 2006, 59(8/9/10/11): 990-999
[22] Christensen P R, Hamilton V E, Mehall G L, et al. The OSIRIS-REx thermal emission spectrometer (OTES) instrument[J]. Space Science Reviews, 2018, 214(5): 1-39
[23] Sanctis M C, Coradini A, Ammannito E, et al. The VIR spectrometer[J]. Space Science Reviews, 2011, 163(1/2/3/4): 329-369
[24] Stern S A, Slater D C, Scherrer J, et al. ALICE: the ultraviolet imaging spectrograph aboard the new horizons Pluto-Kuiper Belt mission[J]. Space Science Reviews, 2008, 140(1/2/3/4): 155-187
[25] 王馨悦,孙越强,李永平,等.质谱计在行星系统与小天体探测中的应用[J].深空探测学报,2017,4(6):522-528
WANG Xinyue, SUN Yueqiang, LI Yongping, et al. The application of mass spectrometer in planetary system and small solar system bodies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(6): 522-528
[26] Mahaffy P R, Webster C R, Cabane M, et al. The sample analysis at Mars investigation and instrument suite[J]. Space Science Reviews, 2012, 170(1/2/3/4): 401-478
[27] Kissel J, Höfner H, Haerendel G, et al. COSIMA: a high resolution time-of-flight secondary ion mass spectrometer for cometary dust particles on its way to comet 67P/Churyumov-Gerasimenkov [C]// Proceedings of the Conference Dust in Planetary Systems, 2005: 94
[28] Balsiger H, Altwegg K, Bochsler P, et al. Rosina-Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis[J]. Space Science Reviews, 2007, 128(1/2/3/4): 745-801
[29] Goesmann F, Rosenbauer H, Roll R, et al. Cosac, the cometary sampling and composition experiment on Philae [J]. Space Science Reviews, 2007, 128(1/2/3/4): 257-280
[30] Wright I P, Barber S J, Morgan G H, et al. Ptolemy: an instrument to measure stable isotopic ratios of key volatiles on a cometary nucleus[J]. Space Science Reviews, 2007, 128(1/2/3/4): 363-381
[31] Todd J F J, Barber S J, Wright I P, et al. Ion trap mass spectrometry on a comet nucleus: the Ptolemy instrument and the Rosetta space mission[J]. Journal of Mass Spectrometry, 2007, 42(1): 1-10
[32] 周志权,吕浩,张栋,等.质谱仪在深空探测中的应用[J].质谱学报,2015,36(6):492-505
ZHOU Zhiquan, LÜ Hao, ZHANG Dong, et al. Application of mass spectrometer in deep-space exploration [J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2015, 36(6): 492-505
[33] Hoffman J H, Hodges, DE Evans. Lunar orbital mass spectrometer experiment[C]// Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 1972: 2205-2207
[34] McNutt R L, Livi S A, Gurnee R S, et al. The Pluto energetic particle spectrometer science investigation (PEPSSI) on the new horizons mission [J]. Space Science Reviews, 2008, 140(1/2/3/4): 315-385
[35] Kissel J, Krueger F R, Silén J, et al. The cometary and interstellar dust analyzer at comet 81P/wild 2[J]. Science, 2004, 304(5678): 1774-1776
[36] Palmer P T, Limero T F. Mass spectrometry in the US space program: past, present, and future [J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2001, 12(6): 656-675
[37] Hoffman J H, Hodges R R, Wright W W, et al. Pioneer Venus sounder probe neutral gas mass spectrometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1980, 18(1): 80-84
[38] Niemann H B, Atreya S K, Bauer S J, et al. The gas chromatograph mass spectrometer for the Huygens probe[M]// The Cassini-Huygens Mission. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003: 553-591
[39] Waite J H, Lewis W S, Kasprzak W T, et al. The Cassini ion and neutral mass spectrometer (INMS) investigation [J]. Space Science Reviews, 2004, 114(1/2/3/4): 113-231
[40] 王瑞刚,苏彦,洪天晟,等.表层穿透雷达在月球和深空探测中的应用[J].天文研究与技术,2020,17(4):492-512
WANG Ruigang, SU Yan, HONG Tiansheng, et al. A review of application of surface penetrating radar in the moon and deep-space exploration[J]. Astronomical Research & Technology, 2020, 17(4): 492-512
[41] 丁春雨,封剑青,郑磊,等.雷达探测技术在探月中的应用[J].天文研究与技术,2015,12(2):228-242
DING Chunyu, FENG Jianqing, ZHENG Lei, et al. A review of applications of radar-detection techniques in lunar explorations [J]. Astronomical Research & Technology, 2015, 12(2): 228-242
[42] Hamran S E, Berger T, Brovoll S, et al. RIMFAX: a GPR for the Mars 2020 rover mission[C]//2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 2015. DOI: 10.1109/IWAGPR.2015.7292690
[43] Zhou B, Shen S X, Ji Y C, et al. The subsurface penetrating radar on the rover of China's Mars 2020 mission[C]//2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2016: 1-4

[44] Carr C, Cupido E, Lee C G Y, et al. RPC: the Rosetta plasma consortium[J].Space Science Reviews,2007,128(1/2/3/4):629-647
[45] Auster H U, Apathy I, Berghofer G, et al. ROMAP: Rosetta magnetometer and plasma monitor[J].Space Science Reviews,2007,128(1/2/3/4):221-240
[46] Du A M,Zhang Y,Li H Y,et al.The Chinese Mars ROVER fluxgate magnetometers[J].Space Science Reviews,2020,216(8):1-15
[47] 平劲松,王明远,张素君,等.嫦娥系列探月卫星无线电科学实验简介[J].深空探测学报,2014,1(3):192-199
PING Jinsong, WANG Mingyuan, ZHANG Sujun, et al. Radio science experiments in Chang'e series missions [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(3): 192-199
[48] Pätzold M,Häusler B,Aksnes K,et al.Rosetta radio science investigations (RSI)[J].Space Science Reviews,2007,128(1/2/3/4):599-627
[49] Kofman W,Herique A,Goutail J P,et al.The comet nucleus sounding experiment by radiowave transmission (CONSERT): a short description of the instrument and of the commissioning stages[J].Space Science Reviews,2007,128(1/2/3/4):413-432
[50] 颜则东,柏树,姚日剑,等.深空微小尘埃探测[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集.哈尔滨,2010:301-308
YAN Zedong,BAI Shu,YAO Rijian,et al.Micro-dust detection in deep space[C]//The Seventh Annual Symposium of Committee of Deep Space Exploration Technology Chinese Society of Astronautics.Harbin,2010:301-308
[51] Colangeli L, Lopez-Moreno J J, Palumbo P, et al. The grain impact analyser and dust accumulator (GIADA) experiment for the Rosetta mission: design, performances and first results[J].Space Science Reviews,2007,128(1/2/3/4):803-821
[52] Riedler W,Torkar K,Jeszenszky H,et al.MIDAS-the micro-imaging dust analysis system for the Rosetta mission [J]. Space Science Reviews, 2007, 128 (1/2/3/4): 869-904
[53] Tuzzolino A J,Economou T E,McKibben R B,et al.Dust flux monitor instrument for the stardust mission to comet wild 2[J].Journal of Geophysical Research: Planets,2003,108(E10):8115
[54] Bolton S J, Young D T, Burch J L, et al. Plasma experiment for planetary exploration (PEPE)[J].AIP Conference Proceedings,1997,387(1):241-244

Development of scientific instruments for deep space exploration

GAO Zhenyu[1] WANG Minjian[2] HUANG Fan[2] SONG Aiguo[1] ZHU Lifeng[1]
1 School of Instrument Science and Engineering,Southeast University,Nanjing 210096
2 Shanghai Institute of Satellite Engineering,Shanghai 201109

Abstract Deep space exploration aims at the exploration of planets, moons, asteroids, comets and space environment in the universe other than the Earth.It is an important task to properly select scientific instruments for deep space exploration,which enable human to figure out the physical and chemical environment,topography,dynamic characteristics and the existence of organic matter and water.It is of great significance for mankind to explore the existence of extraterrestrial water and life,as well as the origin and evolution of the solar system.This paper summarizes the scientific objectives of the deep space exploration,then introduces the scientific instruments and their characteristics for typical deep space exploration missions in recent 50 years,including mass spectrometer,spectrometer,ground penetrating radar and magnetometer, and sorts out their performance parameters, the exploration oriented missions and tasks of the instruments.Finally,this paper discusses the development trend of scientific instruments for deep space exploration,such as miniaturization,low power consumption,stronger environmental adaptability and the combination of multiple instruments.

Key words deep space exploration; payload; mass spectrometer; spectrometer; ground penetrating radar; magnetometer