

嫦娥四号着陆器有效载荷任务设计与验证

徐海涛¹ 薛长斌¹ 刘鹏¹ 杨眉² 李飞²
陈丽平² 纪奕才³ 张坤毅¹

(1 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190)(2 北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)
(3 中国科学院电子学研究所,北京 100190)

摘 要 嫦娥四号着陆器落月后载荷需进行初始状态建立,载荷初始状态建立过程与探测器两器分离过程交叉,对飞行程序设计提出了挑战。文章针对嫦娥四号有效载荷分系统与探测器总体设计,按照着陆器各载荷的任务要求,结合月面工作的约束条件,从系统的角度对载荷开展探测任务的内容、顺序和时机进行设计和优化,并按照设计的工作流程,开展了着陆区的就位探测,验证了任务设计的合理性和载荷技术状态的正确性,可为后续探测任务中载荷与探测器系统联合飞行程序设计提供参考。

关键词 嫦娥四号着陆器;有效载荷;科学探测;月球背面

中图分类号:V476.3 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1673-8748.2019.04.016

Payload Task Design and Verification of Chang'e-4 Lander

XU Haitao¹ XUE Changbin¹ LIU Peng¹ YANG Mei² LI Fei²
CHEN Liping² JI Yicai³ ZHANG Shenyi¹

(1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(2 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)
(3 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: After the landing of Chang'e-4 spacecraft on the moon, payloads need to establish the initial state. This process intersects the separation process of the lander and the rover, which challenges the design of the working program. This paper, from the point of Chang'e-4 payload subsystem and spacecraft system, optimized the content, sequence and timing of the payload detection task based on the constraints of lunar surface work, according to the task requirements of each payload of the lander. And then the in-situ detection of landing area is carried out according to the designed workflow. The rationality of task design and the correctness of technical status were verified. This paper provides reference for the joint working program design of payload and spacecraft system in subsequent exploration missions.

Key words: Chang'e-4 lander; payload; scientific exploration; farside of the moon

月球正面与背面的地质特征存在巨大差异,其成因是月球科学研究的重大难题之一。着陆区的高分辨率地形地貌探测,将识别探测区域的各种地质构

造特征,进而划分不同的地质构造单元^[1]。月球背面屏蔽了地球的无线电干扰、闪电和极光无线电发射,被认为是开展低频射电天文学观测的绝佳地

收稿日期:2019-07-09; 修回日期:2019-07-16

基金项目:国家重大科技专项工程

作者简介:徐海涛,男,副研究员,从事复杂航天电子及其系统研究工作。Email: xuhaitao@nssc.ac.cn。

点^[2]。另外,对月球表面复合辐射场剂量率的时间变化和线性能量传递(LET)谱^[3]的探测,为未来的载人登月辐射防护提供依据,并能够确定月球背面粒子通量及其时间变化,用于研究和理解粒子在日球层的加速和传输过程。在以往人类历史上从未有过在月球背面进行低频射电就位探测,尽管月球背面是低频射电天文学观测的绝佳地点,但着陆器本身电子设备工作又带来了电磁干扰^[4]。

嫦娥四号是探月四期首战任务,在本次任务中,创新性的使用了短天线进行了近场噪声抵消,并且在月面工作程序中专门设计天线展开前的噪声定标,大幅度提高了探测灵敏度。同时,由于探测器携带的核源给月球表面辐射场剂量率测量带来了误差,在月面工作程序中专门设计两器分离前核源剂量测试和巡视器在月面不同位置进行核源剂量测试,以此计算巡视器核源在探测面的等效剂量,也大幅度降低了核源剂量的影响。着陆器探测任务配置的降落相机、地形地貌相机、低频射电频谱仪和月球中子及辐射剂量探测器在探测器软着陆前后陆续开机工作^[5]。

本文提出了着陆器载荷月面工作程序与探测器工作程序交叉设计的问题,对有效载荷初态建立和开展就位探测工作的程序设计,以及在轨测试阶段的验证情况进行了介绍。

1 着陆器有效载荷的组成和任务

嫦娥四号探测器有效载荷分系统的主要任务是获取科学数据并实现科学目标。其中着陆器有效载荷分系统的基本配置为北京空间机电研究所研制的降落相机、中国科学院光电技术研究所研制的地形地貌相机和中国科学院电子所研制的低频射电频谱仪。依据工程总体的国际合作项目遴选结果,着陆器还配置有德国基尔大学研制的月球中子及辐射剂量探测器(见图1)^[6]。

着陆器有效载荷分系统通过载荷电控箱对上述载荷进行供配电、状态监测、数据处理、健康维护和集中管理,使有效载荷分系统集成后简化与着陆器平台的接口。

嫦娥四号着陆器平台大部分继承了嫦娥三号的技术状态,对有效载荷进行了重新配置,其中降落相机、地形地貌相机为完全继承状态,而低频射电频谱仪和月球中子及辐射剂量探测器为新增载荷,有效载荷分系统为适应新载荷状态和探测器接口的继承

状态,在嫦娥三号的基础上对载荷电控箱进行了适应性改造,保证了所有载荷能通过电控箱匹配与着陆器平台接口。

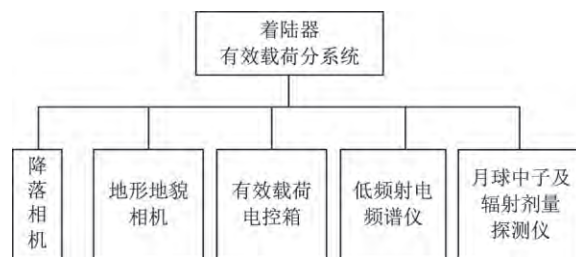


图1 着陆器有效载荷分系统组成

Fig. 1 Composition of lander payload subsystem

1) 降落相机的主要探测任务

降落相机安置在着陆器的底部舱内,在着陆器降落过程中,获取着陆区域的光学图像,用于分析着陆区月表的地形地貌和区域地质情况,图像可用于巡视器进行路径规划,并辅助其他载荷进行科学探测^[7]。

降落相机主要指标包括:成像距离 $4\text{ m} \sim \infty$,有效像元数量 1024×1024 ,视场角 $45^\circ \times 45^\circ$,系统静态调制传递函数(MTF) ≥ 0.20 。

2) 地形地貌相机的主要探测任务

地形地貌相机安装在着陆器上指向机构顶部,通过指向机构进行方位和俯仰调整,地形地貌相机用于获取着陆区高分辨率彩色图像,对于完成着陆区地貌和地质构造调查,月球地质构造解析和综合研究具有重要意义,地形地貌相机在向人类直观呈现月球背面的地形地貌方面也有较高的展现能力^[8]。

地形地貌相机主要指标包括:成像距离 $5\text{ m} \sim \infty$,有效像元数量 2352×1728 ,视场角 $22.9^\circ \times 16.9^\circ$,系统 MTF ≥ 0.20 。

3) 低频射电频谱仪的主要探测任务

低频射电频谱仪安装在着陆器顶板,接收天线 A/B/C 两两垂直,天线 A 沿着着陆器 +X 方向垂直向上安装,天线 B/C 水平安装。低频射电频谱仪的功能是探测太阳爆发产生的低频电场,给出太阳爆发低频电场的幅度随频率变化的特性^[9],并利用月球电离层对太阳爆发电场的截止特性研究月球电离层的特性,同时监测月表低频辐射电场的特性。

低频射电频谱仪主要指标包括:工作频率 $0.1 \sim 40\text{ MHz}$,接收灵敏度 $8\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,系统增益 $\geq 47\text{ dB}$,系统动态范围 $\geq 95\text{ dB}$ 。

4) 月球中子及辐射剂量仪的主要探测任务

月球中子及辐射剂量探测仪(Lunar Lander Neutrons & Dosimetry, LND)安装在-Y舱内,从-Y舱上面开口并设置活动盖板,月昼时打开探测,月夜时闭盖保温,LND通过开展月表中性粒子和带电粒子综合剂量率、LET谱、粒子辐射构成及能谱监测,全面测量月表综合粒子辐射及其动态变化,为准确评估月表辐射危害,服务于未来人类登月活动安全保障提供必要的支持。同时,为开展日球层科学相关研究做出贡献。

LND主要指标包括:快中子能谱 $2\sim 20\text{ MeV}$,热中子通量 $10\sim 104\text{ 个/分钟}$,质子能谱 $7\sim 30\text{ MeV}$,电子能谱 $60\sim 500\text{ keV}$, α 粒子能谱 $7\sim 20\text{ MeV/n}$,重离子能谱 $10\sim 100\text{ MeV/n}$,LET谱范围 $0.1\sim 430\text{ keV}/\mu\text{m}$ 。

2 月面工作程序设计

着陆器有效载荷分系统月面工作程序从主减速段开始,执行到月夜休眠,其中第一月昼全部载荷完成开机和探测任务。从第二月昼开始,仅低频射电频谱仪和月球中子辐射剂量仪开机工作,其他载荷不再开机工作。电控箱作为载荷工作的支撑设备,同时作为平台数管1553B总线重要数据备份终端,全程开机工作。

着陆器有效载荷月面工作程序设计如图2所示,其中圆圈表示探测器动作,方框表示与有效载荷相关的动作。后续每个月昼重复休眠和唤醒,及中间的探测动作。

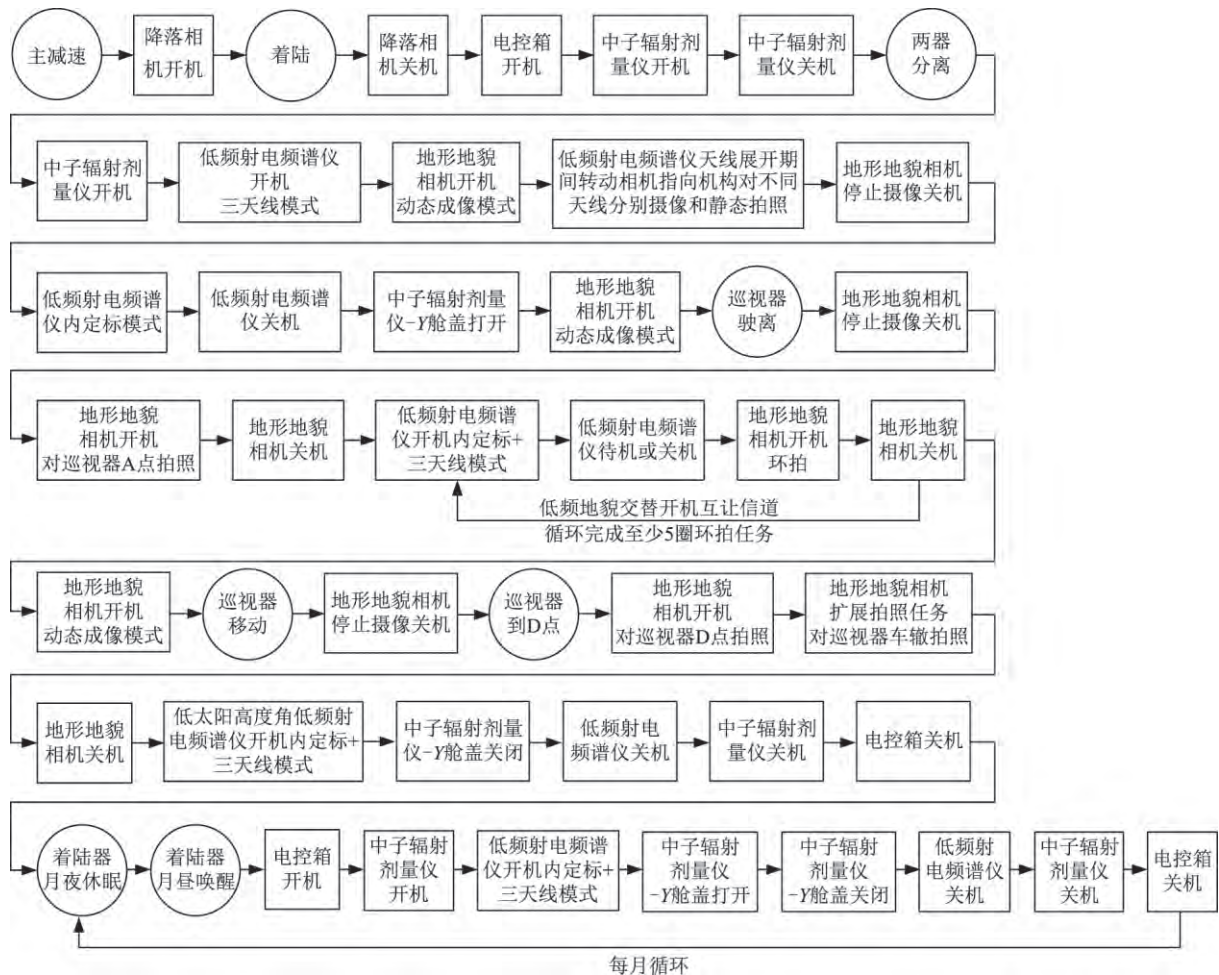


图2 着陆器有效载荷月面工作程序设计

Fig. 2 Design of lunar workflow for lander payload

1) 降落相机工作程序设计

着陆器降落相机程序设计为:在主减速段开机

工作,以10帧/秒的帧频对下降过程动态成像,主减速段、快速调整段、接近段、悬停段、缓速下降段,直

到成功落月后关机。

与嫦娥三号不同,采用中继通讯的嫦娥四号探测器数据传输码率明显下降,为适应新的平台条件,保证在动力下降过程中仍然能够传输直观画面到地面,降落相机做了适应性改造设计,即在原有 8:1 压缩比的基础上,增加 64:1 的高压缩比图像抽帧功能,将图像每 10 帧抽取一张高压缩比图像进入实时下传信道,保证地面每隔 6~7 s 可以收到一张实时回传的降落画面,同时将原始图像存入平台存储器,待落月后回放传输到地面。

2) 地形地貌相机工作程序设计

同样考虑中继链路的码速率,地形地貌相机每幅静态图像传回需要 1 min 以上,动态图像每拍摄 1 min 需要传输 3 min 以上。因此,地形地貌相机在确保完成既定任务的前提下,需要对拍照流程设计进行缩减和优化,以提高信道利用率。

地形地貌相机落月后首先对低频射电频谱仪天线展开动作进行动态摄像和展开状态的静态拍照,之后对巡视器 X 点到 A 点驶离过程进行动态摄像,对巡视器在 $A \rightarrow B(B') \rightarrow C(C') \rightarrow D$ 点静态拍照,期间根据信道空闲情况对巡视器预定停留点间移动和原地转弯过程进行动态摄像。在完成对巡视器拍照的基础上,变换不同俯仰角度,对着陆区环境进行至少 5 圈环拍,形成 360°全景照片。工作期间考虑温度过高时图像噪点将增加,需监视相机温度,适时进行关机避暑。

3) 低频射电频谱仪工作程序设计

低频射电频谱仪使用三根互相垂直的 5 m 天线进行低频射电探测,因探测过程受着陆器电子设备发射的低频电场干扰影响较大,为此专门设计了短天线,对近场噪声进行测量,进而抵消着陆器本底噪声。

除此之外,在月面进行天线展开之前,专门设计了 5 min 低频三天线模式探测。由于展开前天线处于较短状态,仅为 500 mm 左右,其接收到的噪声信号与 5 m 天线接收的噪声信号是成比例关系,利用这种比例关系,可以将收拢状态接收到的噪声信号按比例放大,反相后就可以用来消除 5 m 天线展开后收到的噪声。

低频天线展开后,设计 10 min 内定标模式探测,确认低频射电频谱仪接收机各模拟通道的正常状态,之后即可进入长期探测模式。

4) 月球中子及辐射剂量仪工作程序设计

在嫦娥四号着陆器和巡视器上装载有放射性同位素热源(RHU)和放射性同位素温差电池(RTG)

为两器提供热能和电源。RHU/RTG 是具有放射性的核源,会持续不断的发射中子/伽马(n/γ)射线。尽管 RHU/RTG 已经进行了很好的屏蔽,但 n/γ 射线在物质中具有很强的穿透性,因此 RHU/RTG 会穿透着陆器的屏蔽结构,入射到月球中子及辐射剂量探测仪 LND 探测面中,引起 LND 的本底计数增加,降低 LND 的在轨的科学数据精度。

核源的安装时机临近发射,在塔架上不具备对核源本底测试的时机和条件。基于上述原因,需要在地面对着陆器核源本底噪声进行摸底。除此之外,月面工作程序设计在两器分离前,LND 开机工作,近距离测量巡视器核源本底噪声,在两器完成分离后,巡视器到达 X 点,LND 再次开机工作,测量相对位置变化时,辐射剂量的变化情况,为后续 LND 测量的两器本底噪声扣除提供依据。

在完成落月初始的本底测试工作后,月球中子及辐射剂量探测仪即进入长期探测模式。

3 任务验证情况

1) 降落相机任务验证情况

北京时间 2019 年 1 月 3 日,嫦娥四号探测器按原计划进入动力下降过程,降落相机按设计流程开机工作,约 10 min 后关机。降落相机在轨共拍摄了 5441 幅完整的有效数据,主要完成了主减速段中期、快速调整段、接近段、悬停段、缓速下降段和落月后对视场范围内景物的拍照。从图像中可清晰看出月球轮廓、月表地理特征及月尘被吹起的形态等。如图 3 所示,降落相机成像清晰、曝光适度,获取了既定科学数据。

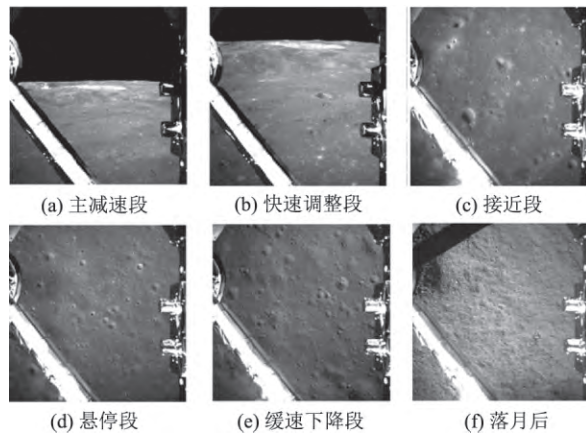


图 3 降落相机拍照画面

Fig 3 Landing camera pictures

2) 地形地貌相机任务验证情况

地形地貌相机仅在第一月昼工作,期间共拍摄了421幅静态图像,主要包括低频解锁、A点两器互拍、俯仰角 0° 、 -15° 、 -30° 、 -45° 四个位置环拍、B'点试拍、D'点试拍以及D'点正式两器互拍。此外,地形地貌相机在轨还进行了动态摄像,主要包括对低频天线解锁展开抽样摄像、监视巡视器X点移动至A点、A到A'点移动摄像以及地形地貌相机拍摄B'点到D'移动过程。从静态图像中可以清晰看到月球背面的月壤、从环拍图像可以看到着陆器周围的月貌、从两器互拍图像可以清晰看到玉兔二号巡视器,五星红旗闪耀月背。如图4所示,地形地貌相机成像清晰、曝光适度,获取了既定科学数据。

3) 低频射电频谱仪任务验证情况

2019年1月4日,嫦娥四号低频射电频谱仪按设计流程加电,随后在天线收拢状态进行了3天线工作模式测试,四通道天线接收到的低频段和高频段噪声信号分别如图5所示。从图5中可以看出,

四个通道接收到的噪声信号频谱分布一致性良好,变化趋势较为一致,判定各通道工作状态正常。

随后按图2设计流程,在地面指令控制下低频射电频谱仪天线A、B、C在月面展开,展开长度约为5m,展开遥测计数分别为432、433以及438,三天线完全展开。

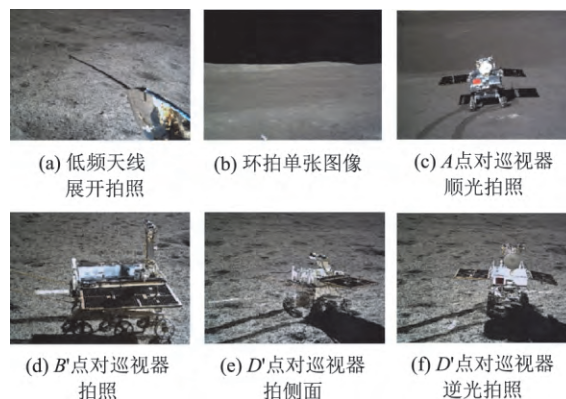
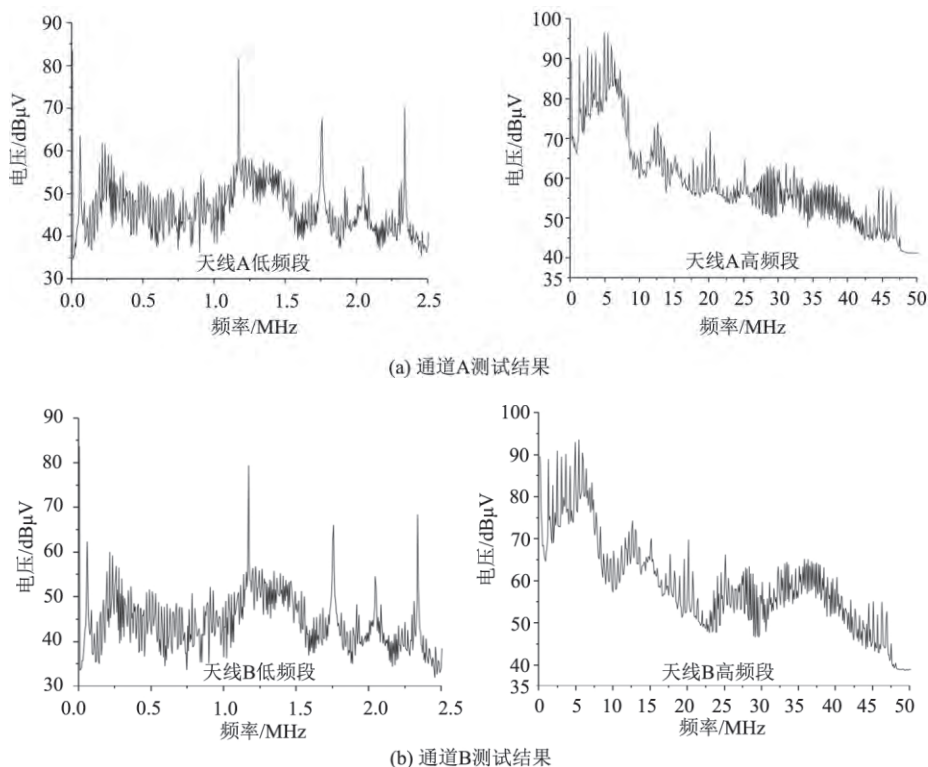


图4 地形地貌相机拍照的部分画面

Fig 4 Some photographs taken by topographic camera



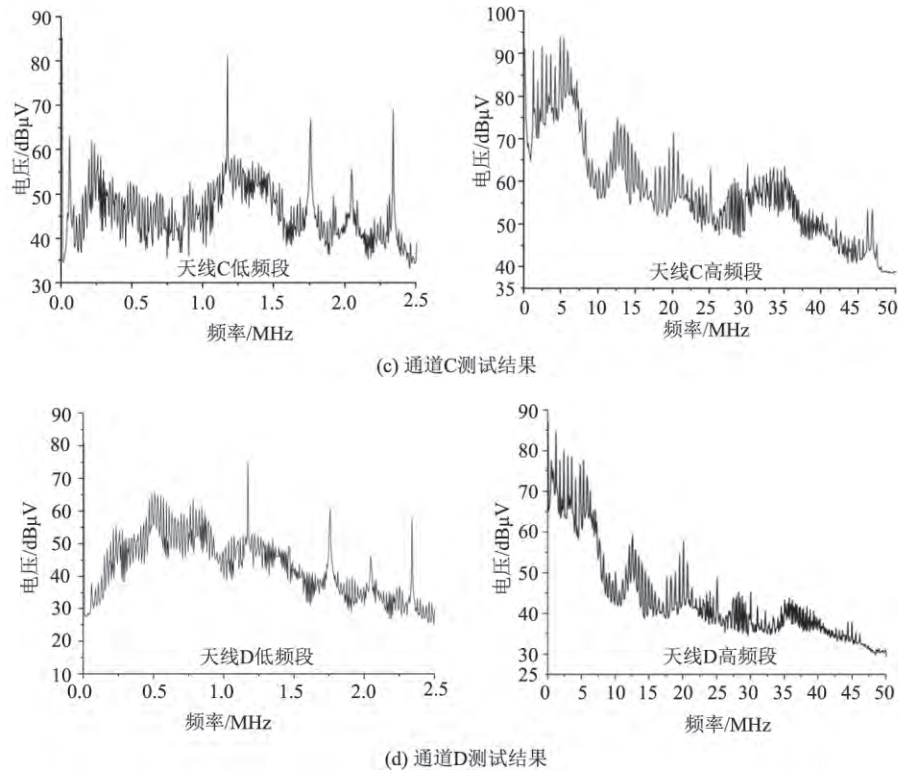


图 5 收拢状态三天线模式测量结果

Fig. 5 Measurement results of tighten up state three-antenna mode

图 6~图 8 给出了低频射电频谱仪天线展开后收到的噪声及噪声对消处理结果。从图中可以看出采用短天线进行对消降噪后,在 100 kHz~40 MHz

频带噪声降低约 20~30 dB,短天线对消处理方法有效,为低频射电频谱仪在月球背面的长期有效探测和分析奠定了基础。

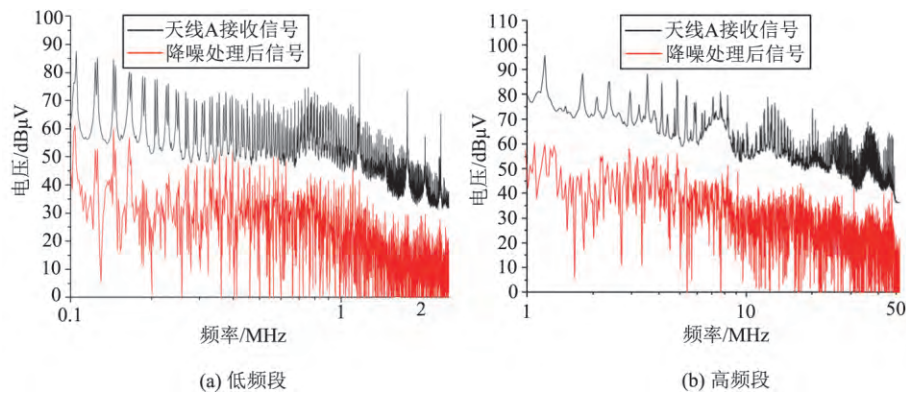


图 6 低频射电频谱仪天线 A 收到的信号及噪声处理结果

Fig. 6 Signal and noise processing results received by antenna A

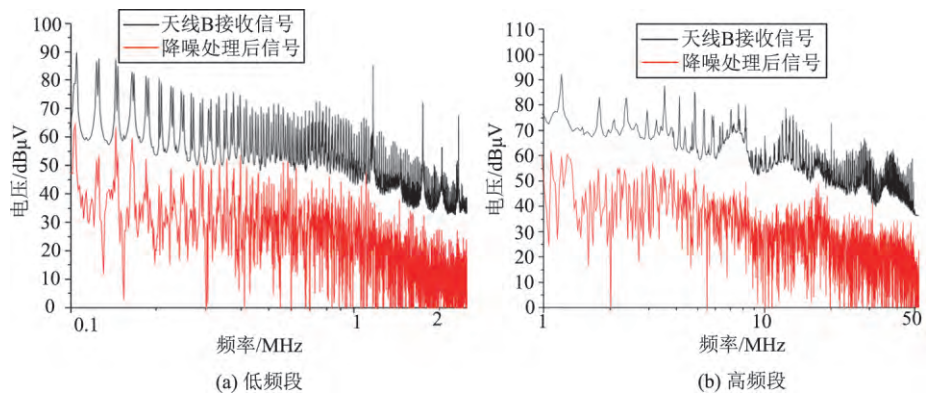


图 7 低频射电频谱仪天线 B 收到的信号及噪声处理结果

Fig. 7 Signal and noise processing results received by antenna B

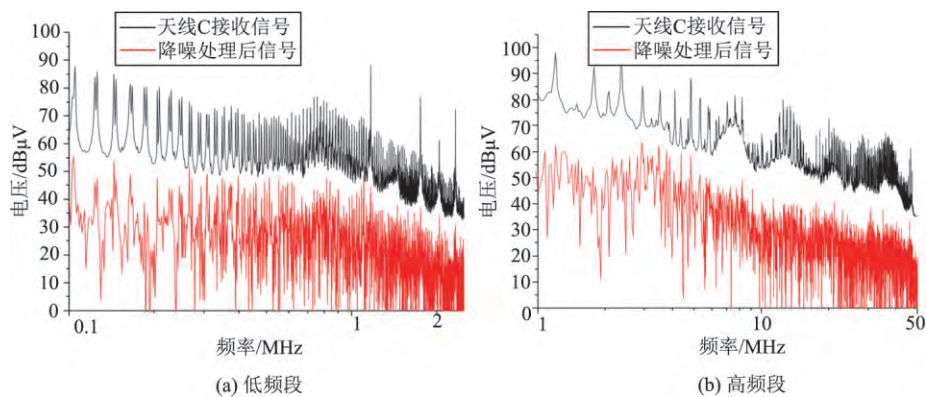


图 8 低频射电频谱仪天线 C 收到的信号及噪声处理结果

Fig. 8 Signal and noise processing results received by antenna C

4) 月球中子及辐射剂量探测仪任务验证情况

LND 自 2019 年 1 月 3 日开机后,连续获得月

表粒子辐射环境数据,包括热中子、快中子、辐射剂量、LET 谱、带电粒子等信息,如图 9 所示。

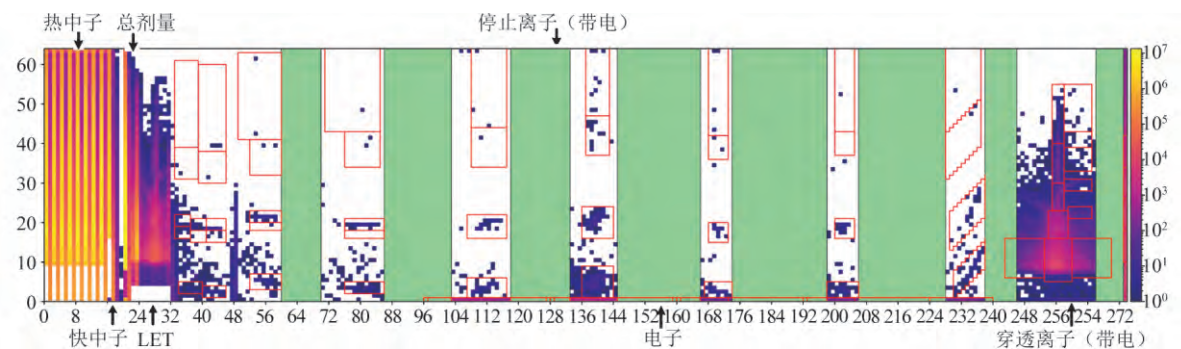


图 9 LND 测量数据二维图

Fig. 9 Two-dimensional map of LND measurement data

通过图 9 可以看到 LND 持续工作,工作状态正常,各待测物理量的结果符合预期,数据持续有效。

可以看出辐射剂量测量结果在两器分离前受到了巡视器 RTG 核源的影响,测量结果中混入了

RTG 核源的本底贡献,在巡视器驶离着陆器后,RTG 核源的本底影响消失。根据设计的月面程序 LND 在两器分立前后分别开机测试,辐射剂量测量结果差为 $2\text{ }\mu\text{Gy/h}$ 左右,该值即为巡视器 RTG 的

核源本底,这与地面测试的结果基本一致。开盖与闭盖的剂量测量结果基本相同,说明-Y舱盖的屏蔽对本底的影响可以忽略,这也与月表的粒子辐射主要是高穿透能力的银河宇宙线的科学认识相符。

在第一个月昼休眠前,随着2019年1月11日19点28分-Y舱两相流体回路打开,富含氢的流体对 neutron 有了明显的吸收作用,导致中性粒子剂量测量降低了 $0.3\mu\text{Gy/h}$ 左右。

上述测量结果为LND在月球背面的长期有效剂量探测和数据分析奠定了基础。

4 结束语

嫦娥四号着陆器有效载荷从动力下降段开始,按照本文设计的工作流程陆续开机工作,降落相机和地形地貌相机完成了大量的拍照任务,通过地面数据处理,及时完整地获取了着陆区地形地貌图像数据。月球中子及辐射剂量探测仪和低频射电频谱仪通过月面工作程序设计和数据处理有效降低了本底剂量和噪声影响,为后续科学探测进一步取得丰硕成果奠定基础。

参考文献 (References)

- [1] 褚桂柏,张焱.月球探测器技术[M].北京:中国科学技术出版社,2007
Chu Guibai, Zhang He. Lunar probe technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007 (in Chinese)
- [2] 孙辉先,李慧军,张宝明.中国月球与深空探测有效载荷技术的成就与展望[J].深空探测学报,2017(6):495-509
Sun Huixian, Li Huijun, Zhang Baoming. Achievements and prospects of lunar and deep space exploration payload technology in China[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017(6):495-509 (in Chinese)
- [3] 魏志勇.辐射剂量学[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版

社,2010

Wei Zhiyong. Radiation dosimetry[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010 (in Chinese)

- [4] 吴伟仁,王琼,唐玉华.“嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J].深空探测学报,2017,4(2):111-117
Wu Weiren, Wang Qiong, Tang Yuhua. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2):111-117 (in Chinese)
- [5] 薛长斌,周晴,王雷.“嫦娥4号”任务有效载荷系统设计与实现[J].深空探测学报,2017,4(6):515-521
Xue Changbin, Zhou Qing, Wang Lei. Design and implementation of payload system in Chang'e-4 mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(6):515-521 (in Chinese)
- [6] 贾瑛卓,邹永廖,薛长斌.嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置[J].空间科学学报,2018,38(1):118-130
Jia Yingzhuo, Zou Yongliao, Xue Changbin. Scientific objectives and payloads of Chang'e-4 mission [J]. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(1):118-130 (in Chinese)
- [7] 贾瑛卓,代树武,吴季.嫦娥三号着陆器有效载荷[J].空间科学学报,2014,34(2):219-225
Jia Yingzhuo, Dai Shuwu, Wu Ji. Chang'e-3 lander's scientific payloads[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(2):219-225 (in Chinese)
- [8] 代树武,贾瑛卓,张宝明.嫦娥三号有效载荷在轨测试初步结果[J].中国科学(技术科学),2014,44(4):361-368
Dai Shuwu, Jia Yingzhuo, Zhang Baoming. Chang'e-3 scientific payloads and its checkout results[J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(4):361-368 (in Chinese)
- [9] 谢处方,饶克谨.电磁场与电磁波[M].北京:高等教育出版社,2006
Xie Chufang, Rao Kejin. Electromagnetic field & wave [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006 (in Chinese)

(编辑:李多)