0254-6124/2018/38(1)-118–13 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

JIA Yingzhuo, ZOU Yongliao, XUE Changbin, PING Jinsong, YAN Jun, NING Yuanming. Scientific objectives and payloads of Chang'E-4 mission (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2018, **38**(1): 118-130. DOI:10.11728/cjss2018.01.118

嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置 *

贾瑛卓[1,2,3] 邹永廖[1] 薛长斌[2]
平劲松[1] 严 俊[1] 宁远明[4]

1(中国科学院国家天文台 北京 100012)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100090)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(探月与航天工程中心 北京 100037)

摘 要 嫦娥四号探测器由中继星、着陆器和巡视器组成. 其科学目标为: 月基低频射电天文观测研究, 月球背面巡视区浅层结构探测研究以及月球背面巡视区形貌与矿物组分探测研究. 共配置 6 台有效载荷设备, 其中 3 台载荷设备配置在着陆器上, 分别为降落相机、地形地貌相机和低频射电谱仪, 其余 3 台配置在巡视器上, 分别为全景相机、测月雷达和红外成像光谱仪. 本文主要论述了嫦娥四号任务的科学目标、着陆区概况、有效载荷配置及系统设计、各有效载荷任务和主要技术指标等.

关键词 月球探测, 嫦娥四号, 科学目标, 有效载荷

中图分类号 V 11

Scientific Objectives and Payloads of Chang'E-4 Mission

JIA Yingzhuo[1,2,3] ZOU Yongliao[1] XUE Changbin[2]
PING Jinsong[1] YAN Jun[1] NING Yuanming[4]

1(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012)

2(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

3(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

4(*Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing* 100037)

Abstract The Chang'E-4 lunar explorer is composed of a communication relay satellite, a lander and a rover. The latter two are the backup of Chang'E-3. It is estimated that the Chang'E-4 explorer will be launched by the end of 2018, which is scheduled to land at the South Pole Aitken (SPA) basin, and carry out in-situ detection and reconnaissance at the farside of the moon with the communication

* 国家自然科学重大基金项目资助 (41590851)
2017-03-01 收到原稿, 2017-09-01 收到修定稿
E-mail: jiayingzhuo@bao.ac.cn

support of the relay satellite. Chang'E-4 mission has been planned to install six scientific payloads to complete the corresponding tasks. Three payloads are installed on the lander, including the Landing Camera (LCAM), the Terrain Camera (TCAM), and the Low Frequency Spectrometer (LFS); and the other three payloads are installed on the rover, including the Panoramic Camera (PCAM), the Lunar Penetrating Radar (LPR), and the Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer (VNIS). The LFS is newly developed for Chang'E-4 lander, and the other five payloads are inherited instruments from Chang'E-3. Besides the above six payloads, there are also three international joint collaboration payloads to be installed on Chang'E-4 explorer, which are the Lunar Lander Neutrons and Dosimetry (LND) on the lander, the Advanced Small Analyzer for Neutrals(ASAN) on the rover, and Netherlands-China Low-Frequency Explorer (NCLE) on the relay satellite. In this paper, the scientific objectives, landing area overview, payload configurations and system designs, and the task for each payload with its main technology index of Chang'E-4 mission are mainly discussed.

Key words Lunar exploration, Chang'E-4, Scientific objectives, Payloads

0 引言

中国的月球探测计划嫦娥工程分为绕、落、回三步, 分别以环绕月球实现全局探测、在月面软着陆并巡视开展精细探测、在月球表层采集样品并带回地球进行实验室研究为目标, 逐次实施探月一、二、三期工程. 探月一期工程的嫦娥一号卫星于 2007 年 10 月 24 日发射, 成为继人造地球卫星、载人航天之后中国航天活动第三个里程碑. 探月二期工程包括嫦娥二号、嫦娥三号和嫦娥四号 3 次任务, 其中嫦娥三号探测器于 2013 年 12 月发射, 成功着陆于月球虹湾地区, 开展测月、巡天、观地探测活动, 获取大量科学数据, 得到多项科学发现, 同时实现探月二期 "落" 的任务目标. 嫦娥二号是工程先导星, 嫦娥四号是嫦娥三号的备份器. 探月三期于 2011 年立项, 任务目标是实现月面无人采样返回, 工程规划了 2 次正式任务和 1 次飞行试验任务, 分别命名为嫦娥五号、嫦娥六号和高速再入返回飞行试验任务. 其中, 嫦娥五号探测器是中国首个实施月面取样返回的航天器.

嫦娥四号由中继星、着陆器和巡视器组成. 中继星为新研制产品, 预计 2018 年 5 月前后发射, 在轨运行三年. 着陆器和巡视器是基于嫦娥四号先期投产的产品, 预计 2018 年 12 月发射, 经过约 27 天飞行, 在月球背面实施动力下降, 着陆于月球背面南极艾特肯撞击坑盆地 (South Pole Aitken basin, SPA 盆地). 嫦娥四号任务将实现人造航天器首次在月球背面软着陆, 通过在地月 L2 点绕飞的中继卫星支持, 开展就位探测和巡视勘测.

在科学目标和有效载荷配置方面, 嫦娥四号基于对嫦娥三号科学探测和研究成果的新认识, 基于嫦娥三号任务的经验, 制定了嫦娥四号科学目标和科学探测任务, 并根据新的科学探测任务, 从科学创新性和时间进度两方面考虑, 对嫦娥三号有效载荷进行必要的调整.

1 科学目标

在最大限度利用嫦娥三号技术和产品的基础上, 最终确定嫦娥四号的科学目标为: 月基低频射电天文观测研究; 月球背面巡视区浅层结构探测研究; 月球背面巡视区形貌与矿物组分探测研究.

1.1 月基低频射电天文观测研究

受地球电离层反射和人工无线电的干扰, 在地球及地球轨道上难以开展频率低于 10MHz 的射电天文观测. 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, 月夜期间还屏蔽了强烈的太阳射电辐射. 因此月球背面被认为是开展低频射电天文观测的绝佳地点. 欧空局 (ESA) 已提出在月球背面开展低频射电天文观测的计划 [1,2].

利用月球背面独特的无线电环境, 嫦娥四号将对银河系的低频大尺度辐射特性进行研究: 通过长期观测, 描绘银河系较高分辨率射电巡天图像; 联合地面观测阵列, 首次开展地–空间的低频射电天文空间干涉测量技术试验; 揭示行星低频射电爆发的成因机

制, 检验行星磁层低频射电辐射随行星尺度变化的幂率谱规律假说, 为在射电波段观测系外行星提供基本线索和参考依据; 通过对太阳射电低频段爆发观测研究, 揭示太阳高能粒子的加速机制和传播特征, 提高对灾害性空间天气事件的预报水平; 填补 0.1~1 MHz 射电天文观测的空白, 在太阳风激波、日冕物质抛射和高能电子束的产生机理等方面取得原创性的成果.

有效载荷配置及对应科学探测任务是利用着陆器上配置的低频射电谱仪以及中继星上搭载的荷兰科学院研制的低频射电谱仪, 联合开展低频射电观测. 在低频波段 1~80 MHz 频带内, 通过 3 年的观测, 获得 2 个频点 (含) 以上的天空背景射电巡天图像; 在 0.1~1 MHz 频带开展对地球的千米波射电辐射探测; 在 1~40 MHz 频带开展木星射电辐射探测, 并基于行星射电爆发的监测结果, 检验行星磁层低频射电辐射随行星尺度变化的幂率谱规律假说 [3]; 在 0.1 MHz 以上的波段开展灾害性空间天气事件以及太阳射电 Ⅱ 型爆发和 Ⅲ 型爆发的系统观测和综合研究, 揭示太阳高能粒子的加速源区、加速机制和传播特征, 研究行星际日冕物质抛射和行星际激波的动力学过程和结构演化; 于 40 万公里距离上开展地–月空间低频射电天文的同步测量, 同时开展首次空间干涉测量技术试验 5~10 次, 以成功实施 1 次干涉测量试验、获得测量结果为目标.

1.2 月球背面巡视区浅层结构探测研究

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. 月球南极艾特肯撞击坑 (SPA) 盆地直径 2500 km, 深 12 km, 是月球上最古老、最大和最深的撞击坑. 巨大的撞击坑有可能露出下月壳, 甚至月幔的物质, 因此对于认识月球的深部物质组成具有重要意义 [4]. 尽管地势低洼, 但是该区域并未像其他月球盆地一样被玄武岩填充, 暗示了其特殊的热历史和独特的演化特征. SPA 盆地表现为盆地内部叠加了大量不同年代、不同形态的撞击坑或撞击盆地, 这有助于解释或暴露月球更深层的构造和成分. 撞击坑或盆地的形态与撞击点的月壤厚度、岩性以及撞击形成年代直接有关, 能提供月球早期演化历史的证据. Hiesinger[5] 等根据 Clementine 激光高度计数据清楚地鉴别出 SPA 盆地东北部三个大型环形构造. 这些形态特征与 SPA 的形成演化过程存在何种内在关系不得而知, 需要进一步根据撞击过程与形态结构特征的内在关系进行模拟和论证. 对月球背面巡视区开展月表浅层结构及内部结构探测, 获得月球背面的月壳厚度以及核–幔边界等重要成果, 不仅可以清楚地认识月球的状态、结构和组成, 还可以为月球的起源与演化研究提供最可靠、直接的证据, 对月球早期演化历史给出新的认识.

有效载荷配置及对应科学探测任务是利用巡视器上配置的测月雷达 (Lunar Penetrating Radar, LPR) 开展巡视区月壤厚度、浅层结构探测, 并对典型撞击坑表面结构进行探测和研究. 月壤探测深度大于 30 m, 分辨率优于 30 cm; 月壳探测深度大于 100 m, 分辨率优于 10 m[6]. 结合嫦娥三号巡视器探测成果的对比研究, 可在月壤和月壳的地质演化细节研究方面获得新认知 [7]. 分析月球浅层结构及其演化历史, 有望实现在月球演化模型及其理论体系研究方面的重大突破.

1.3 月球背面巡视区形貌与矿物组分探测研究

月球表面的地形地貌不仅是月球演变表层结果的综合体现, 也是月球与外界接触、受外界干扰和撞击的直接对象和产物, 很多内部信息都可以从月表地形地貌特征和组合特征中提取. 月球背面巡视区月表的地形地貌和矿物组分探测是开展月球科学研究必要的基础信息, 撞击坑是月球表面显著的地貌特征, 通过对典型撞击坑的形态、结构、光谱特征等进行深入调查, 将为成坑机制、撞击效应和演化历史提供丰富的信息. SPA 盆地内月坑与月海撞击坑明显, 退化程度低、完整性好, 其形成、演化、地貌和地球化学特征与其他地区都有明显差异. 因此, SPA 盆地被认为是研究月球深部物质组成的重要窗口. 嫦娥四号任务选择 SPA 作为着陆区, 也是考虑了该区域物质组成和地质演化的独特性.

有效载荷配置及对应的科学探测任务是利用着陆器上配置的降落相机 (Landing Camera, LCAM)、地形地貌相机以及巡视器上配置的全景相机和红外成像光谱仪, 开展月表形貌三维成像就位探测和月表物质成分就位分析, 特别是区域内广泛分布撞击坑形态和统计研究. 同时, 配合光谱探测手段, 可对撞击坑进行三维立体多光谱探测, 获取撞击坑三维几何形貌、撞击坑抛射物的分布和剖面结构等. 红外成像光谱仪光谱范围覆盖可见–近红外波段, 根据硅酸盐矿物在此波段的吸收特征可以识别辉石、橄榄石和斜长石等造岩矿物. 由于全球尺度的遥感探测发现该区域富含铁镁成分, 因此在巡视探测过程中有可能发

现苏长岩、橄长岩等超镁铁质岩石类型 [8]. 这些岩石样品将是研究下月壳、月幔组成, 揭示该区域独特地质演化历史, 分析月球早期演化的重要样品. 嫦娥四号任务中采用多种探测手段, 将在国际上首次建立月球背面集地形地貌、地质构造、物质成分、浅层结构于一体的综合地质剖面, 并建立区域性的地球化学与构造动力学演化模型.

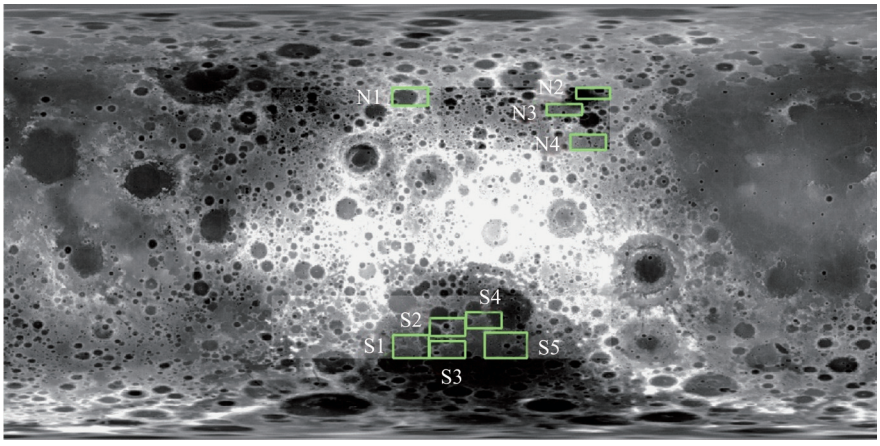
2 着陆区概况

根据嫦娥四号任务工程总体要求, 中国科学院月球与深空探测重点实验室与航科集团五院总体部联合开展了嫦娥四号着陆区的选址工作. 选址主要考虑科学目标和工程能力两个方面, 在保证安全的前提下, 所选区域要具有一定的科学研究价值, 同时在地形和通信等方面也要满足工程要求. 最初的选址范围确定为纬度: 30°−55°S, 30°−55°N; 经度: 110°−180°E, 110°−180°W. 纬度方向覆盖范围不小于 2°, 经度方向覆盖范围不小于 14°. 根据 500 m 空间分辨率数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据统计, 所选区域坡度范围 $< 8°$ 的区域不少于 60%. 中国科学院月球与深空探测重点实验室利用月球 500 m 空间分辨率数字高程数据和坡度数据, 初选了 9 个区域作为备选着陆区, 其中月球北半球 4 个 (N1~N4), 南半球 5 个 (S1~S5), 如图 1 所示 [9].

在对这 9 个预选着陆区进行地质形貌和高程剖面分析后, 着重进行了与科学探测意义相关的月尘分布、剩磁分布、温度与粒子辐射、区域性地球化学、构造动力学与内部圈层结构、低频天文观测等深入分析, 通过综合分析备选着陆区在科学目标可实现程度方面的差异, 最后遴选月球 SPA 盆地 S5 区作为最合适的着陆区.

S5 的位置为 45°−55°S, 162°−144°W, 区域内最大高程差 6518 m, 坡度 $< 8°$ 的区域面积占总区域面积比为 81.53%. 区域内露出的基底物质主要为酒海纪平原地层, 分布着几个形成于酒海纪或前酒海纪的较古老的撞击坑, SPA 盆地中还有许多后期叠加的撞击坑或盆地 [10,11]. 这些撞击坑形成时, 既有各自撞击产生物质的堆积, 也有 SPA 盆地溅射物质的堆积, 例如酒海纪的 Ingenii 坑和前酒海纪的阿波罗盆地, 都有 SPA 盆地溅射物质新带入的物质成分 [12,13]. 因此研究 SPA 盆地中的月坑或盆地有助于了解月球从前酒海纪到雨海纪经历的一系列撞击事件, 也提供了划分月球地体构造和地质年代的依据.

月球 SPA 盆地位于月球背面, 主体范围从月球南极延伸到艾特肯月坑 (Aitken Crater). 尽管地势低洼, 但是该区域并未像其他月球盆地一样被玄武岩



N1: 55°–48°N, 160°–175°E
N2:55°–51°N, 110°–124.5°W
N3: 48°–44°N, 122°–136°W
N4: 30°–36°N, 112°–127°W

S1: 46°–55°S, 160°–175°E
S2: 39°–46°S, 175°N–170°W
S3: 48°–55°S, 175°N–170°W
S4: 36°–43°S, 170°–155°W
S5: 45°–55°S, 162°–144°W

图 1 嫦娥四号预选着陆区全月分布

Fig. 1 Distribution of the alternative landing sites for Chang'E-4 mission

填充, 暗示了其特殊的热历史和独特的演化特征. 该区域富含铁镁的物质 [14], 对其研究有可能揭示下月壳甚至上月幔的物质组成. 因此, SPA 盆地被认为是研究月球深部物质组成的重要窗口. 各类月球探测器的探测数据表明, SPA 盆地具有独特的地球化学特征, 盆地含有较高的 Fe, Ti, Th 元素. 此外, SPA 盆地是月球背面 FeO 和 TiO_2 异常区域, 盆地内的 FeO 含量较周边高地高出 7%, 其内部有些区域 TiO_2 含量出现增强现象且显示出较高的 Th 和 K 值 [15,16]. SPA 盆地中岩石以斜长岩和斜长质苏长岩为主, 玄武岩和橄长岩很少 [13]. SPA 盆地地势低, 月壳较薄, 理论上应出现大量月海玄武岩, 目前数据认为尽管在某些撞击坑中有月海物质, 对其玄武岩含量的探测可能对月球的热历史演化和早期分异过程具有某种指示意义. 位于月球南极圈内的 SPA 盆地中存在没有阳光照射的阴影区, 从理论上讲, 这些撞击坑可能保存有水冰, 这一假设如果得到证实, 将有可能在月球上建立供水和制造氧气、氢气的基地.

3 有效载荷配置及系统设计

3.1 有效载荷系统设计

为满足重量和功耗约束, 有效载荷进行了轻小型化集成设计. 在着陆器上配置降落相机、地形地貌相机、低频射电谱仪和一台着陆器载荷电控箱. 在巡视器上配置全景相机、测月雷达、红外成像光谱仪和一台巡视器载荷电控箱. 载荷电控箱集成了系统内每台载荷设备的一块电子学板, 同时电控箱配置电源配电单元、计算机单元、测控及总线单元, 用于对有效载荷设备进行供配电、指令控制和数据处理. 采用这种集成设计, 主要是为了减轻系统重量和体积. 每个载荷电控箱都有一个中心处理单元 (Central Processing Unit, CPU) 和若干分布式现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA), 用来对各载荷探头进行控制. 载荷电控箱还可以为各载荷探头进行供配电管理, 可以将母线 +28 V 一次电源转换成 +5 V, ±15 V, +3.3 V 二次电源给载荷探头使用, 同时可以检测载荷探头的电压和温度 [17,18]. 着陆器有效载荷系统组成和巡视器有效载荷系统组成及接口分别如图 2 和图 3 所示. 着陆器载荷电控箱内部集成了 6 块电子学板, 其中 3 块为有效载荷电子学板, 另外 3 块是统一为整个着陆器有效载荷系统进行配电、控制、数据存储的电子学板. 载荷电控箱的功能包括三个方面: 一是为各有效载荷探头进行供配电; 二是对接收预处理的数据进行缓存, 并进行初步计算和处理; 三是通过 1553B 总线和 LVDS (Low-Voltage Differential Signaling) 总线与探测器数据管理器连接, 传递有效载荷数据. 着陆器各载荷探头通过 422 总线和 LVDS 总线与载荷电控箱连接, 用来传输控制信号和科学探测数据. CPU 采用 ATMEL AT697F 进行核心控制, 采用 256 M 同步动态随机存储器 (Synchronous Dynamic Random Access Memory, SDRAM) 进行数据和程序存储, 512 kBytes 带电可擦可编程只读存储器 (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM) 存储飞行代码和引导程序代码, 6 个型号为 XQR2V3000 的 FPGA 控制和接收载荷探头的科学数据, 并向探测器数据管理器进行传输. 利用一个看门狗定时器监视处理器状态, 如果处理器工作异常, 看门狗将复位处理器, 进行软件重新启动. 采用至少 0.38 cm 厚度的铝进行重点区域辐射防护, 保护设备不受月面空间辐射环境影响.

巡视器载荷电控箱内部也集成了 6 块电子学板, 其中 3 块统一为巡视器有效载荷系统进行配电、控制和数据存储, 另外 3 块分别为测月雷达控制器板、红外光谱仪电子学板和中性原子探测仪接口板. 巡视器各载荷探头通过 422 总线和 LVDS 总线与载荷电控箱连接, 传输控制信号和科学探测数据. 巡视器载荷电控箱中心控制器采用了 80C32 数据处理器, 利用 256 M 的 SDRAM 进行科学数据存储, 6 个型号为 XQR2V3000-4CCG717 的 FPGA 进行巡视器载荷探头控制和数据接收.

3.2 有效载荷单机设计及主要技术指标

3.2.1 降落相机

降落相机安置在着陆器底部, 垂直指向月表, 主要探测任务是获取着陆器降落过程中各个高度时段降落区域的月球地形地貌图像. 降落相机采用光学、结构、电子学一体化设计, 根据探测的需求, 选用CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 图像传感器作为探测器. 降落相机在着陆器降落过程中成像, 降落过程存在水平和垂直运动, 在积分时间内, 运动产生的像移会影响成像质量. 为降低影响, 降落相机采用较短的曝光时间. 计算结果表明, 在下降过程中, 着陆器的水平速度在相机积分时间内

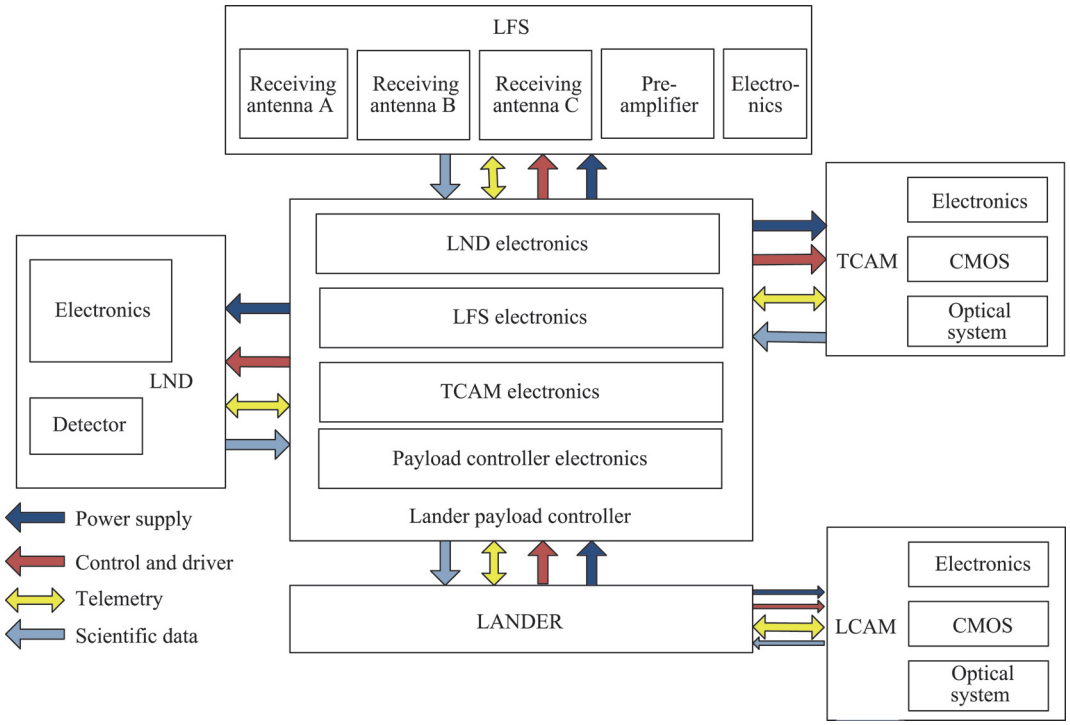


图 2 着陆器有效载荷分系统组成

Fig. 2 Scientific payloads system for the Lander of Chang'E-4 mission

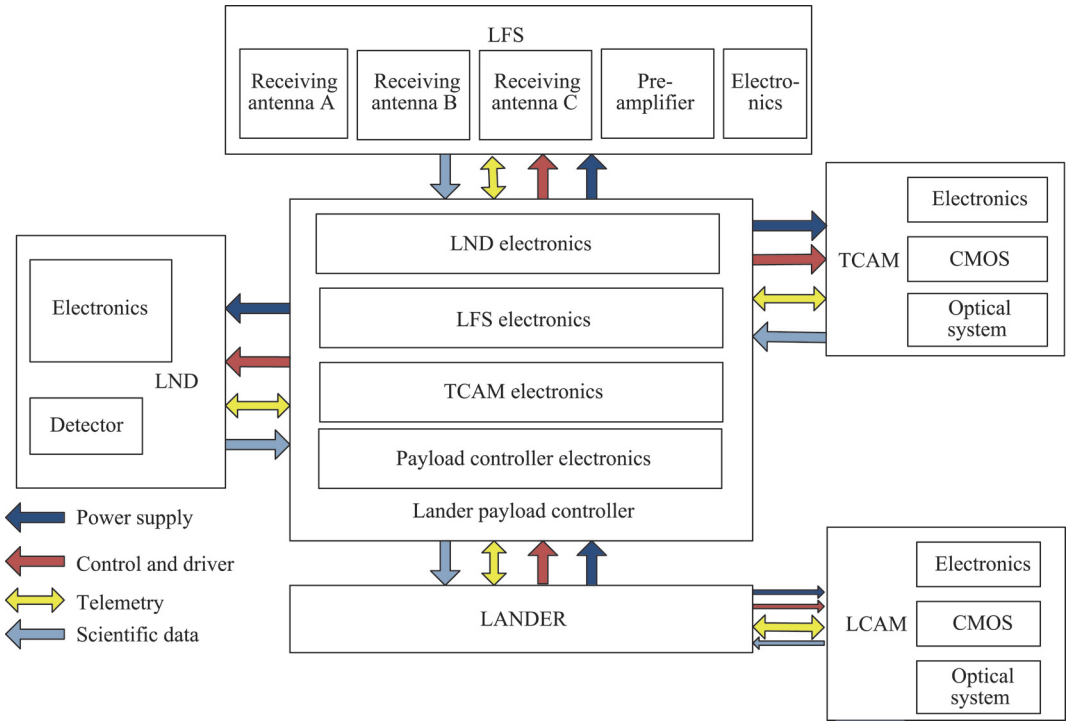


图 3 巡视器有效载荷分系统组成

Fig. 3 Scientific payloads system for the Rover of Chang'E-4 mission

产生的像移小于 0.5 pixel, 由此调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 下降因子小于 0.9, 对相机成像质量影响很小. 垂直速度对像的影响优于 0.72%[17,18], 不会造成相机 MTF 的下降, 对相机成像质量没有影响. 降落相机系统组成见图 4, 主要性能指标列于表 1.

3.2.2 地形地貌相机

地形地貌相机安装在着陆器顶部的相机指向机构上, 相机指向机构根据指向信息引导相机探头指向待成像目标的区域. 根据地形地貌相机功能要求和性能要求, 整个相机采用分体式结构, 主要由安装在着陆器相机指向机构上的相机探头和安装在着陆器有效载荷电控箱内的图像压缩板组成. 地形地貌相机系统组成如图 9 所示. 相机探头由遮光罩、光学镜头、CMOS-APSCMOS 彩色探测器、驱动电路、时序电路和相机探头的机械结构等组成. 相机指向机构控制地形地貌相机对不同区域成像时, 太阳高度角和月表反照率可能变化较大, 需要采用不同的曝光时间. 如果采用试拍后下传图像再根据地面分析结果调整曝光时间的方式, 需要花费很长时间, 为了提高获取图像的速度, 减少地面干预的工作量, 地形地貌相机采用了直方图自动曝光算法, 利用彩色传感器的电子快门来调节曝光时间, 达到自动曝光的目的 [17,18]. 地形地貌相机系统组成见图 5, 主要性能指标列于表 2.

3.2.3 低频射电谱仪

根据嫦娥四号探测器的科学探测目标, 需要对太阳爆发时产生的低频电场进行探测, 并对月球电离层进行研究. 因此需要对来自太阳及其行星际空间、银

表 1 降落相机主要性能指标

Table 1 Performance of the Landing Camera

技术指标	参数
波段范围/nm	419~777
正常成像距离/m	$4 \sim \infty$
有效像元数量	$\geqslant 1024 \times 1024$
视场角/(°)	45×45 (偏差不超过 5%)
系统静态传函	$\geqslant 0.20$ (全视场)
信噪比/dB	$\geqslant 40$ (最大信噪比) $\geqslant 30$ (反照率 0.09, 太阳高度角 30°)

表 2 地形地貌相机的主要性能指标

Table 2 Performance of terrain camera

名称	主要参数和性能
波段范围/nm	420~700
颜色	彩色 (R, G, B)
正常成像距离/m	$5 \sim \infty$
有效像元数量	$\geqslant 2352 \times 1728$
视场角/(°)	$22.9° \times 16.9°$ (偏差不超过 5%)
信噪比/dB	$\geqslant 40$ (最大信噪比) $\geqslant 30$ (反照率 0.09, 太阳高度角 30°)
系统静态传函	$\geqslant 0.20$ (全视场, 静态成像时测)

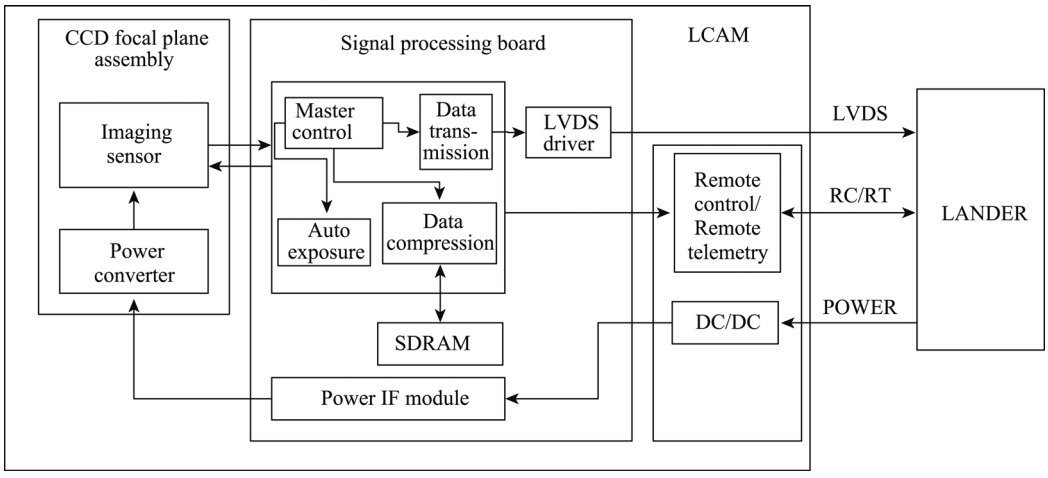


图 4 降落相机系统组成

Fig. 4 Composition diagram of LCAM

河系空间等的低频电场进行探测, 分析电场的幅度、相位、时变、频谱、极化以及来波方向等信息, 并利用空间低频电场信号的变化特性, 研究着陆区域上空月球空间电离层环境的特性.

低频射电频谱仪分系统采用三分量 (矢量) 有源天线单元实现太阳和空间电磁信号的接收, 三天线单元分别接收电磁波信号三个相互垂直的分量. 根据电波传播理论, 通过对三分量观测数据的后期分析和处理, 可以获得低频电磁波强度、频谱、时变、偏振 (极化) 特性、辐射源方位等信息 [19]. 低频射电频谱仪主要由电子学单元、前置放大器、三根接收天线、电缆组件等组成, 其中电子学单元由控制器、配电器、基准时钟模块、多通道接收机、内定标组件、通讯接口、数传接口等组成. 接收天线和前置放大器安装于着陆器舱外, 电子学单元安装于着陆器舱内. 低频射电频谱仪系统组成见图 6, 主要性能指标见表 3.

3.2.4 全景相机

全景相机共两台, 安装在巡视器桅杆上, 依靠桅杆方位和俯仰运动实现对不同区域的 360° 成像. 两台相机光轴分别内扣 1°, 利用双目立体视觉原理获得目标的三维立体图像.

全景相机由光学系统、机械系统、电子学及热控单元等组成, 采用光、机、电、热一体化设计, 结构紧凑, 重量轻, 如图 7 所示. 相机视场角为 19.6°×14.5°,

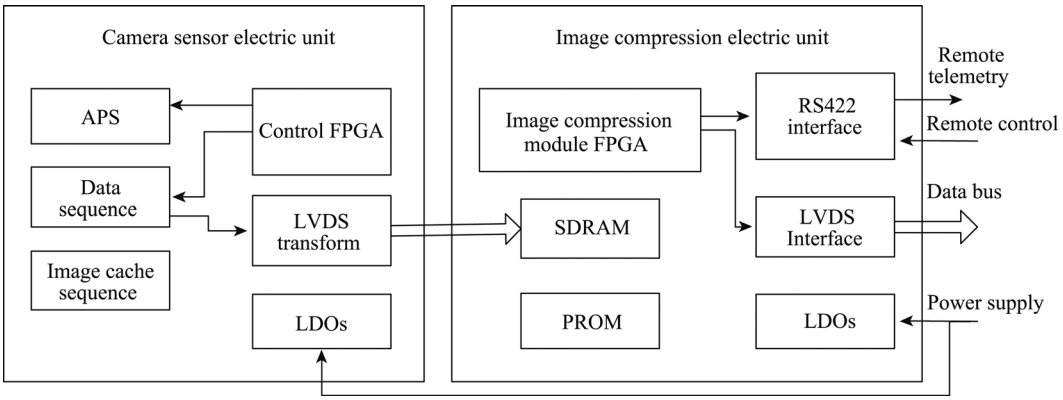


图 5 地形地貌相机系统组成

Fig. 5 Composition diagram of the terrain camera

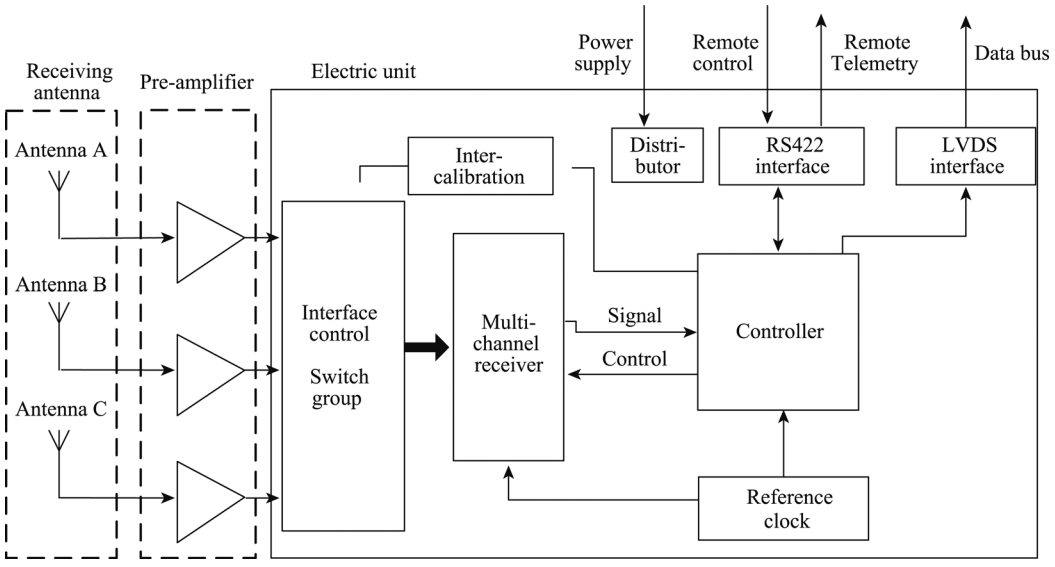


图 6 低频射电频谱仪系统组成

Fig. 6 Composition of the low-frequency radio spectrometer system

可以彩色成像和动态摄像. 全景相机使用 CMOS 彩色传感器 RGB 滤光片结构, RGB 三色在像面的能量比取决于目标反射或辐射光谱色温、探测器 RGB 光谱响应和镜头光谱透过率. 在研制过程中, 利用标准靶标对全景相机色彩进行校正, 使其获得的图像更接近被测目标的色彩 [18,20]. 全景相机系统组成见图 7, 主要性能指标见表 4.

3.2.5 测月雷达

测月雷达的科学探测任务为巡视路线上的月球次表层结构探测, 以研究巡视路线上月壤厚度和结构以及月壳浅层结构. 为兼顾探测深度和分辨率, 采用两个通道进行探测, 在巡视器移动时开机工作. 测月雷达是工作于无载频毫微秒脉冲状态的时间域探测雷达, 主要用来进行巡视线路上月球次表层结构和月壤结构探测, 采用收发分置天线, 发射机产生超宽带无载频毫微秒脉冲, 经发射天线向月面下辐射, 接收天线接收的反射信号经过接收机放大采样后获得相应的探测数据. 测月雷达有两个通道天线, 第一通道天线中心频率为 40~80 MHz, 第二通道天线中心频率为 250~750 MHz[21], 测月雷达系统组成见图 8, 主要性能指标见表 5.

3.2.6 红外成像光谱仪

红外成像光谱仪的主要任务是获取巡视区周围的可见光谱段图像以及红外光谱曲线, 用于月表矿物组成和分布分析. 红外成像光谱仪由探头、电缆组件以及电子学单元组成, 其中探头由前置光学组件、声光可调滤光器 (Acousto-optic Tunable Filter, AO-

表 3 低频射电频谱仪的主要性能指标

Table 3 Performance of low-frequency radio spectrometer

名称	性能指标
工作频段/MHz	0.1~40
接收机灵敏度/(nV·Hz$^{-1/2}$)	⩽ 10
动态范围/dB	⩾ 75
频率分辨率	1~10 kHz (0.1~1.0 MHz) 100~200 kHz (1.0~40 MHz)

表 4 全景相机主要性能指标

Table 4 Performance of the panoramic camera

技术指标	参数
波段范围/nm	420~700
成像模式	彩色成像、全色成像 (可切换)
正常成像距离/m	3~ ∞
视场角/(°)	19.7×14.5 (偏差不超过 5%)
信噪比/dB	⩾ 40 (最大信噪比) ⩾ 30 (反照率 0.09, 太阳高度角 30°)
系统静态传函	⩾ 0.20 (全视场)

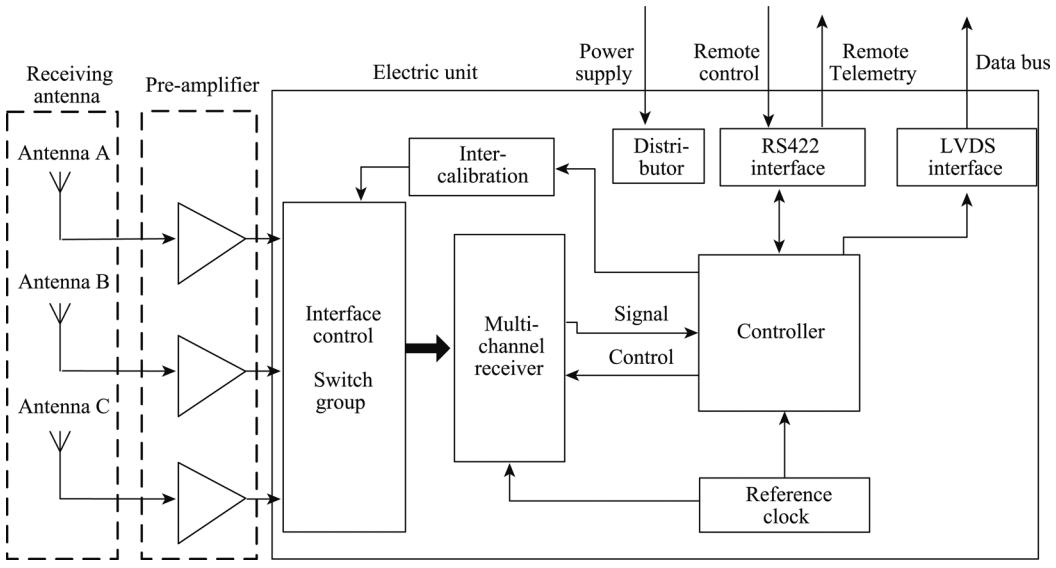


图 7 全景相机系统组成

Fig. 7 Composition diagram of the panoramic camera

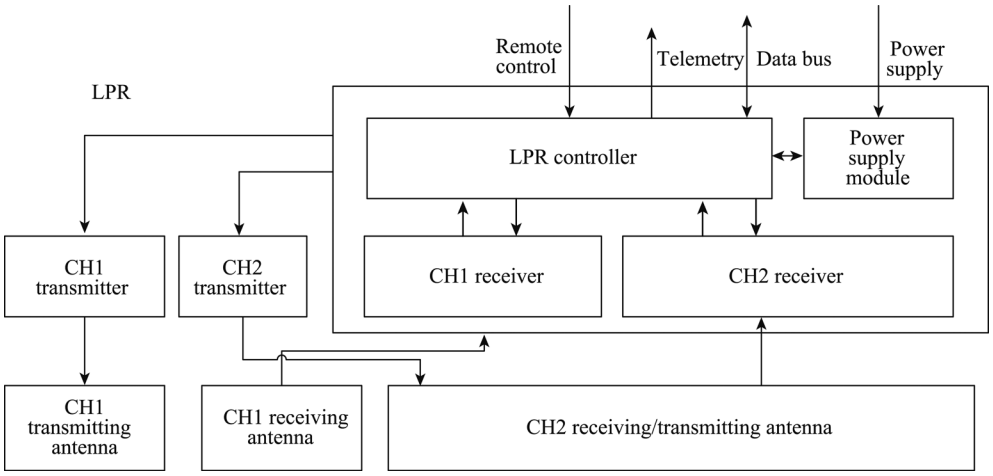


图 8 测月雷达系统组成

Fig. 8 Composition of LPR system

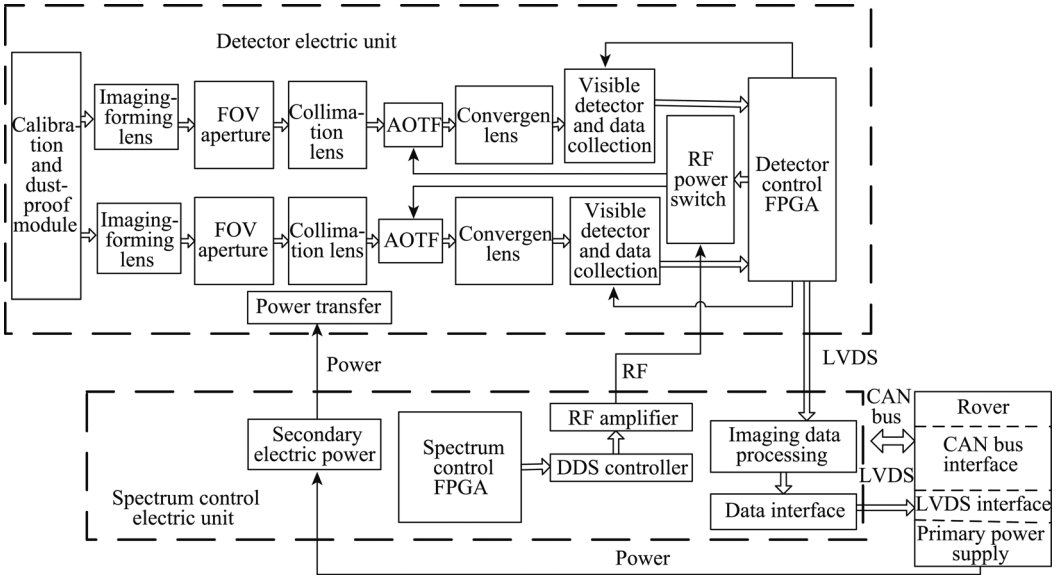


图 9 红外成像光谱仪系统组成

Fig. 9 Composition of Visible and Near-infrared Imaging Spectrometer (VNIS)

TF)、汇聚镜及探测器组件组成, 电子学单元由可见及短波探测器驱动以及信号采集、热电制冷驱动、射频功放、AOTF 功放开关、光谱探测控制、二次电源、防尘电机驱动等组成, 两个光学通道分别为可见光通道和红外近红外通道, 探测波段为 0.4~2.4 μm, 通过 AOTF 进行两个通道的转换 [22]. AOTF 为窄带可调滤光器, 是根据声光作用原理制成的分光器件. 当一束复色光通过一个高频振动的光学弹性晶体时, 某一波长的单色光将在晶体内部产生衍射, 以一定角度从晶体中透射出来, 未发生衍射的复色光则沿原光线传播方向直接透射过晶体. 当晶体振动频率改变时, 可透射单色光的波长也相应改变. 红外成像光谱仪系统组成见图 9, 主要性能指标见表 6.

4 国际合作载荷

嫦娥四号搭载了三台国际合作载荷, 分别为着陆器上搭载的中子与辐射剂量探测仪, 巡视器上搭载的中性原子探测仪, 中继星上搭载的低频射电谱仪. 三台国际合作载荷具有较好的技术成熟度和产品继承

性, 以国际合作方为主进行研发, 其对自主技术拥有知识产权. 合作双方根据工作需要对存在接口的部分以接口控制文件的形式予以明确. 所取得的科学数据和相关成果为合作双方共有. 各国际合作载荷对应的科学目标、国际合作方和中方对应研究负责人 (Principle Investigator, PI) 单位见表 7.

表 5 测月雷达的性能指标

Table 5 Performance of LPR

名称		主要参数和性能	
		第一通道	第二通道
发射机	脉冲电压幅度/V	1000 (偏差不超过 5%)	⩾ 400 (偏差不超过 5%)
	脉冲重复频率/kHz	0.5, 1, 2 (可切换)	5, 10, 20 (可切换)
	脉冲上升时间/ns	⩽ 5	⩽ 1
接收机	工作频带/MHz	10∼175	10∼1000
	输入动态范围/dB	优于 90	优于 90
发射和	中心频率/MHz	60	500
接收天线	工作带宽/MHz	⩾ 40	⩾ 450
	驻波系数	⩽ 3	⩽ 2.5
	探测深度/m	⩾ 100	⩾ 30
	厚度分辨率	米级	⩽ 30 cm

表 6 红外成像光谱仪的性能指标

Table 6 Performance of infrared imaging spectrometer

名称	可见近红外通道	近红外短波红外通道
光谱范围/nm	450∼950	900∼2400
光谱分辨率/nm	2∼10	3∼12
视场/(°)	⩾ 6 × 6	⩾ 2 × 2
系统静态传函 MTF	> 0.1	–
信噪比/dB	⩾ 40 (最大信噪比) ⩾ 30 (反照率 0.09, 太阳高度角 45°)	⩾ 40 (最大信噪比) ⩾ 30 (反照率 0.09, 太阳高度角 15°)

表 7 国际合作载荷科学目标

Table 7 Scientific objectives for the international collaboration payloads

载荷名称	科学目标/探测任务	国际合作方	中方 PI 单位	搭载平台
中子与辐射剂量探测仪 (LND)	测量月表的综合粒子辐射剂量和 LET 谱, 测量月表快中子能谱和热中子通量	德国基尔大学	中科院空间中心	着陆器
中性原子探测仪 (ASAN)	研究月表溅射过程的机理记忆在月球大气形成过程中的作用, 研究月表散射过程中能量中性原子的分布函数及其与地形地貌和地方时的关系	瑞典空间物理研究所	中科院空间中心	巡视器
低频射电探测仪 (NCLE)	在甚低频频段内同时获得频率连续的射电巡天图像, 对宇宙的大尺度结构以及谁单辐射的频率相关性进行研究	荷兰内梅亨大学	中科院国家天文台	中继星

表 8 中子与辐射剂量探测仪主要性能指标

Table 8 Main specifications of lunar neutron and radiation measuring instrument

项目	指标
快中子能谱	2∼20 MeV, 32 个能道
热中子通量	10∼104 min^{-1}
质子能谱	7∼30 MeV, 32 个能道
电子能谱	60∼500 keV, 32 个能道
α 粒子能谱	7∼20 MeV/n, 32 个能道
重离子能谱	10∼30 MeV/n, 32×32 个矩阵
LET 谱范围	0.1∼430 keV/μm, 64 个能道
时间分辨率	剂量率 1 min, 质子 5 min 电子 5 min, 重离子 30 min

注 表中 n 表示每个核子, 例如对于 Fe, n 为 56

表 9 中性原子探测仪主要性能指标

Table 9 Main specifications of Neutral Atom Detector

项目	指标
观测要素	能量中性原子 (ENA), 正离子
能量范围	10 eV∼10 keV
质量分辨率	能量中性原子: 氢原子, 其他成分原子组 正离子: 质荷比 1, 2, 4, 8, 16, 32
能量分辨率	7% (正离子), 30% (能量中性原子)
时间分辨率	10 s

表 10 低频射电谱仪主要性能指标

Table 10 Main specifications of Low Frequency Radio Spectrometer

项目	指标
工作频段/ 频谱分辨率	100 kHz∼1 MHz/1 kHz 1∼10 MHz/10 kHz 10∼80 MHz/100 kHz
时钟稳定度	$< 5 \times 10^{-11}$ (短稳)
接收机灵敏度	$< -160\ \mathrm{dBm{\cdot}Hz^{-1}}$ (10 MHz)
动态范围	$\geqslant 84$ dB
空间干涉基线	$> 400\,000$ km
干涉角分辨率	$\leqslant 1\ \mathrm{Mbit{\cdot}s^{-1}}$

中子与辐射剂量探测仪、中性原子探测仪以及低频射电谱仪主要性能指标分别列于表 8∼10.

5 结语

围绕国家在探月工程上的战略目标, 介绍了嫦娥四号的科学目标和具体科学探测任务, 对预选着陆区进行分析, 进行有效载荷系统设计和单机设计, 提出有效载荷单机技术指标要求, 对国际合作载荷情况进行简单介绍.

参考文献

[1] Wikipedia. Lunar-lunder (space mission.) [EB/OL]. [2014-10-08]. http://en.wikipedia.org/wiki/lunar-lunder (space mission.)

[2] FISACKERLY R, PRADIER A, GARDINI B, *et al*. The ESA lunar lander mission [C]//AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition. Long Beach, California: AIAA, 2011.

[3] ZARKA P. Plasma interactions of exoplanets with their parent star and associated radio emissions [J]. *Planet. Space Sci.*, 2007, **55**(5): 598-617

[4] CHIKMACHEV V I, PUGACHEVA S G, SHEVCHENKO V V. General structure of the lunar South Pole-Aitken Basin and possible genesis of it [C]//Proceedings of the 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference. League City, Texas, 2005: 1078

[5] HIESINGER H, III J W H, WOLF U, *et al*. Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum [J]. *J. Geophys. Res. Planets*, 2003, **108**(E7): 1

[6] LAI Jialong, XU Yi, ZHANG Xiaoping, *et al*. Structural analysis of lunar subsurface with Chang'E-3 lunar penetrating radar [J]. *Planet. Space Sci.*, 2016, **120**: 96-102

[7] ZHANG Jinhai, YANG Wei, HU Sen, *et al*. Volcanic history of the Imbrium basin: a close-up view from the lunar rover Yutu [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2015, **112**(17): 5342-5347

[8] LING Zongcheng, JOLLIFF B L, WANG Alian, *et al*. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'E-3 landing site [J]. *Nat. Commun.*, 2015, **6**: 8880

[9] Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration. Analysis Report on the Location of the Landing Area of Chang'E-4 [R]. Beijing: Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, 2016 (月球与深空探测重点实验室. 嫦娥四号着陆区选址分析报告 [R]. 北京: 月球与深空探测重点实验室, 2016)

[10] WILHELMS D E, HOWARD K A, WILSHI H G. Geologic map of the south side of the moon: U S Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map 1-1162[Z]. Scale 1:5 000 000, 1979: 1-1162

[11] WOOD C A, GIFFORD A W. Evidence for the lunar big backside basin [C]//Multi-Ring Basins: Formation and Evolution Conference Rep. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1980, **414**: 121-123

[12] PETRO N E, PIETERS C M. Surviving the heavy bombardment: ancient material at the surface of south pole-Aitken basin [J]. *J. Geophys. Res.*: *Planets*, 2004, **109**(E6): E06004

[13] PIETERS C M, HEAD III J W, GADDIS L, *et al*. Rock types of south pole-Aitken basin and extent of basaltic volcanism [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(E11): 28001-28022

[14] LIN Yangting. Key issues of the formation and evolution of the Moon [J]. *Geochimica*, 2010, **39**(1): 1-10 (林杨挺. 月球形成和演化的关键科学问题 [J]. 地球化学, 2010, **39**(1): 1-10)

[15] LAWRENCE S J, HAWKE B R, GILLIS-DAVIS J J, *et al*. Composition and origin of the Dewar geochemical anomaly [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: E02001. DOI:10.1029/2007JE002904

[16] PETERSON C A, HAWKE B R, LUCEY P G, *et al*. Anorthosite on the lunar farside and its relationship to south pole-Aitken basin [C]//Proceedings of the 31st Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston, Texas, 2000: 1680-1681

[17] JIA Yingzhuo, DAI Shuwu, WU Ji, *et al*. Chang'E-3 lander's scientific payloads [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(2): 219-225 (贾瑛卓, 代树武, 吴季, 等. 嫦娥三号着陆器有效载荷 [J]. 空间科学学报, 2014, **34**(2): 219-225)

[18] DAI Shuwu, JIA Yingzhuo, ZHANG Baoming, *et al*. Chang'E-3 scientific payloads and its checkout results [J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2014, **44**(4): 361-368 (代树武, 贾瑛卓, 张宝明, 等. 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)

[19] CHEN Linjie, AMIN A, YAN Yihua. Characteristics analysis of Tripole antenna for lunar very low frequency interferometer [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2010, **25**(6): 1064-1072 (陈林杰, AMIN A, 颜毅华. 月基甚低频射电干涉仪 Tripole 天线特性研究 [J]. 电波科学学报, 2010, **25**(6): 1064-1072)

[20] WU Fanlu, LIU Jianjun, REN Xin, *et al*. Research on panoramic mosaics method of Chang'E-3 Pancam images [J]. *Acta Opt. Sin.*, 2014, **34**(9): 915001 (吴凡路, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥三号全景相机图像全景镶嵌方法的研究 [J]. 光学学报, 2014, **34**(9): 915001)

[21] FANG Guangyou, ZHOU Bin, JI Yicai, *et al*. Lunar penetrating radar onboard the Chang'E-3 mission [J]. *Res. Astron. Astrophys.*, 2014, **14**(12): 1607-1622

[22] HE Zhiping, WANG Binyong, LÜ Gang, *et al*. Operating principles and detection characteristics of the Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer in the Chang'E-3 [J]. *Res. Astron. Astrophys.*, 2014, **14**(12): 1567-1577