0254-6124/2014/34(2)-219–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Jia Yingzhuo, Dai Shuwu, Wu Ji, Sun Huixian, Liu Enhai, Wei Jianyan, Chen Bo, Huang Changning, Chen Xiaomin. Chang'E-3 Lander's scientific payloads (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(2): 219-225, doi:10.11728/cjss2014.02.219

嫦娥三号着陆器有效载荷*

贾瑛卓[1] 代树武[1] 吴 季[1] 孙辉先[1] 刘恩海[2]
魏建彦[3] 陈 波[4] 黄长宁[5] 陈晓敏[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院光电技术研究所 成都 610209)

3(中国科学院国家天文台 北京 100012)

4(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 100033)

5(北京空间机电研究所 北京 100076)

摘 要 嫦娥三号着陆器配置了地形地貌相机、月基光学望远镜、极紫外相机、降落相机等四种科学探测有效载荷. 介绍了有效载荷的科学探测任务、系统设计方案和系统组成, 描述了各有效载荷的方案设计和主要技术指标等.

关键词 嫦娥三号, 有效载荷, 地形地貌相机, 月基光学望远镜, 极紫外相机, 降落相机

中图分类号 V 476. 3

Chang'E-3 Lander's Scientific Payloads

JIA Yingzhuo[1] DAI Shuwu[1] WU Ji[1] SUN Huixian[1] LIU Enhai[2]
WEI Jianyan[3] CHEN Bo[4] HUANG Changning[5] CHEN Xiaomin[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610209)

3(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing* 100012)

4(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 100033)

5(*Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing* 100076)

Abstract Four kinds of scientific instruments are chosen as the payloads on Chinese Chang'E-3 Lander, including topography camera, lunar astronomical optical telescope, extreme ultraviolet imager and descending camera. Topography camera is to acquire the optical image of lunar surface topography around the landing area, and observe the rover moving process on the lunar surface. Lunar astronomical optical telescope operates in the near ultraviolet spectrum, which can observe the brightness variations of various stars. Extreme ultraviolet imager works on the wavelength of

* 国家中长期科技发展规划重大专项项目资助

2013-05-08 收到原稿, 2013-12-27 收到修定稿

E-mail: jiayz@nssc.ac.cn

30.4 nm, and the observation target is the resonance scattering between Earth's plasma He^+ layer and 30.4 nm solar radiation. Descending camera is to acquire the lunar optical image in the landing region during descending. In this paper, Chang'E-3 Lander's scientific exploration missions, as well as the payloads' system design are introduced. Each payload's design and main technical specifications are also described in detail.

Key words Chang'E-3, Payload, Topography camera, Lunar optical telescope, Extreme ultraviolet imager, Landing camera

0 引言

中国探月工程二期将首次实现在地外天体的软着陆, 获得月球及地月空间科学数据, 推动中国深空探测技术和空间科学相关技术的深入发展.

嫦娥三号的任务目标是实现月球软着陆和巡视探测, 开展月表地形地貌与地质构造、矿物组成和化学成分、地月空间与月表环境等探测活动, 实现对月球软着陆、月面巡视、月夜生存等重大技术问题的突破. 嫦娥三号卫星由着陆器和巡视器组成, 其各自携带相应的有效载荷进行科学探测. 着陆器配置了地形地貌相机、月基光学望远镜、极紫外相机、降落相机等四种科学探测有效载荷.

嫦娥三号卫星于 2013 年 12 月 2 日 01:30 BLT 从西昌卫星发射中心发射, 12 月 14 日 21:11 BLT 成功实施软着陆, 并通过降落相机传回图像.

本文主要介绍嫦娥三号着陆器有效载荷的探测任务、主要技术指标及方案设计等.

1 科学目标及有效载荷系统组成

1.1 科学探测任务

嫦娥三号着陆器各有效载荷及相应的探测任务列于表 1.

1.2 有效载荷系统组成

嫦娥三号着陆器有效载荷包括地形地貌相机、极紫外相机、月基光学望远镜、降落相机等. 为获取所需科学探测数据, 有效载荷系统设计需要从以下四个方面进行考虑. ①选择合适的传感器, 将探测目标的物理特性转化为电子学信号, 获取原始数据; ②对原始数据进行处理, 获取所需要的探测数据; ③对有效载荷工作参数进行调整, 获得最佳探测效果; ④利用转台等指向调整机构, 对待探测目标进行定位或跟踪. 着陆器有效载荷的任务构成如图 1 所示, 其系统组成如图 2 所示.

2 有效载荷方案设计

2.1 地形地貌相机

地形地貌相机有两个探测任务, 一是获取着陆区光学图像, 用于月表地形地貌的调查研究, 二是跟踪并获取巡视器图像. 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.

根据地形地貌相机的功能及性能要求, 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、安装在着陆器有效载荷电控箱内的图像压缩板组成, 如图 3 所示.

相机探头由遮光罩、光学镜头、CMOS-APS RGB 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. 采用透射式光学系统结构设计方

表 1 嫦娥三号着陆器有效载荷的探测任务

Table 1 Missions of Chang'E-3 Lander's payloads

有效载荷	探测任务
地形地貌相机	获取着陆区周围的月表地形地貌光学图像, 对巡视器月表移动过程进行观测.
月基光学望远镜	工作在近紫外谱段, 对各种天体的亮度变化情况进行观测, 能够连续跟踪观测.
极紫外相机	工作波长为 30.4 nm, 探测目标是地球等离子体层 He^+ 对 30.4 nm 太阳辐射的共振散射, 可连续跟踪探测.
降落相机	着陆器降落过程中, 在各个高度连续获取降落区域的月表光学图像.

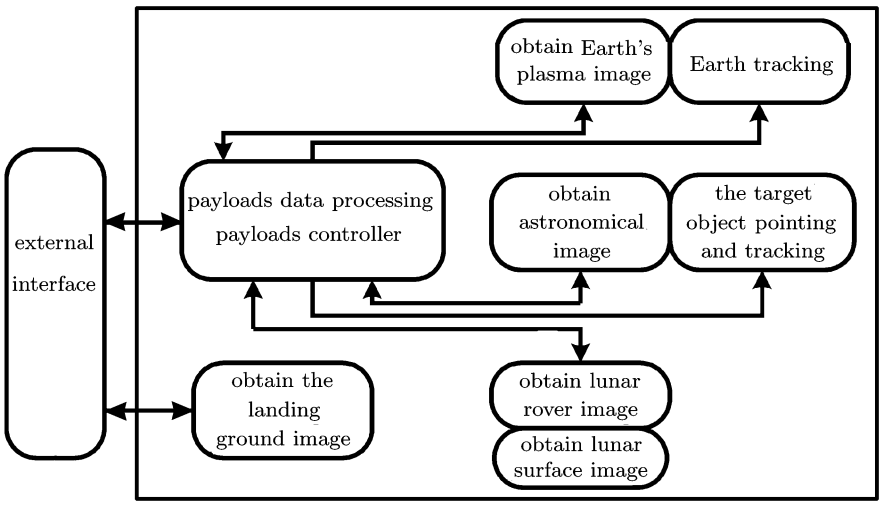


图 1 着陆器有效载荷的任务组成

Fig. 1 Missions of Chang'E-3 Lander's payloads

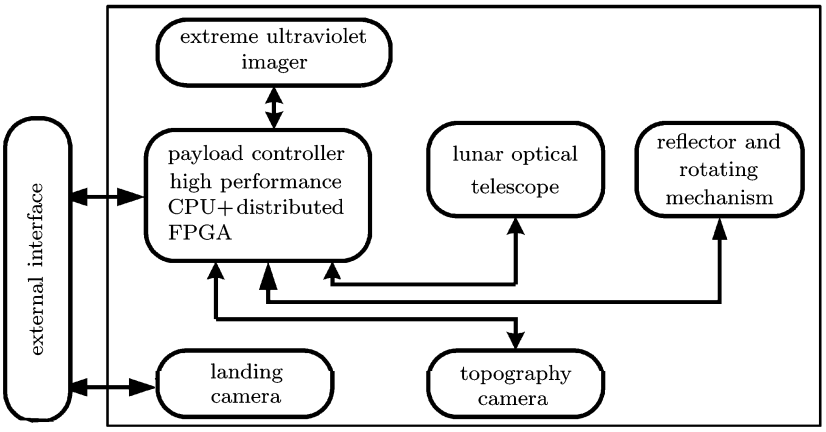


图 2 着陆器有效载荷的系统组成

Fig. 2 Composition of Chang'E-3 Lander's payloads

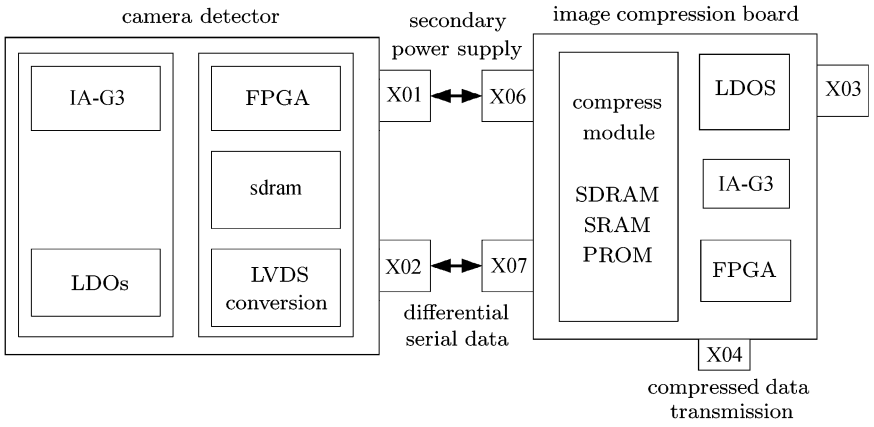


图 3 地形地貌相机系统组成

Fig. 3 Composition of topography camera

案, 设计结果如图 4 所示. 图像压缩板由电源电路、图像压缩电路、接口电路、RS422 接口等组成.

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有可能变化较大, 需要采用不同的曝光时间. 如果采用试拍后下传图像, 然后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.

地形地貌相机技术指标列于表 2.

2.2 月基光学望远镜

月基光学望远镜工作在近紫外谱段, 对各种天文变源的亮度变化进行长时间连续监测, 以研究天体特性. 由于月球自转极为缓慢, 因此, 可以通过间隔一定时间调整一次望远镜指向来保证待测目标在视场中心附近, 实现对一个目标的长时间连续监测.

月基光学望远镜系统由望远镜、探测器、反射镜及转台、控制系统和附属设备等组成, 其系统结构与光路如图 5 所示. 月基光学望远镜探测器选用了高灵敏度的 CCD. 光学设计采用在 Ritchey-Chretien (R-C) 反射式系统中加入 45° 折轴镜的方案, R-C 反射系统与折射式系统相比, 具有不存在色差、近紫外波段能量损失小、结构紧凑、重量轻等优点. 在系统次镜后加入 45° 折轴镜, 将部分长度方向的光路转折到高度方向, 大大缩短了系统长度, 从而能够满足安装空间的约束. 采用反射镜转动方案实现目标跟踪, 设计了一个二维转台, 反射镜安装在转台上, 通过反射镜的二维转动将天体目标反射进入望远镜镜筒内.

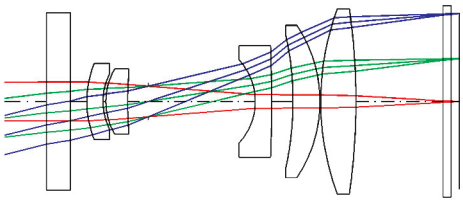


图 4 地形地貌相机光学系统方案

Fig. 4 Optical design of topography camera

表 2 地形地貌相机主要技术指标

Table 2 Technical specifications of topography camera

序号	名称	参数
1	颜色	彩色 (RGB)
2	有效像元数/pixel	2352×1728
3	视场角/(°)	22.9×16.9
4	帧频/(frame·s^{-1})	5
5	信噪比 (SNR)/dB	36 (反照率 0.09, 太阳高度角 30°)
6	调制传递函数 MTF	0.25

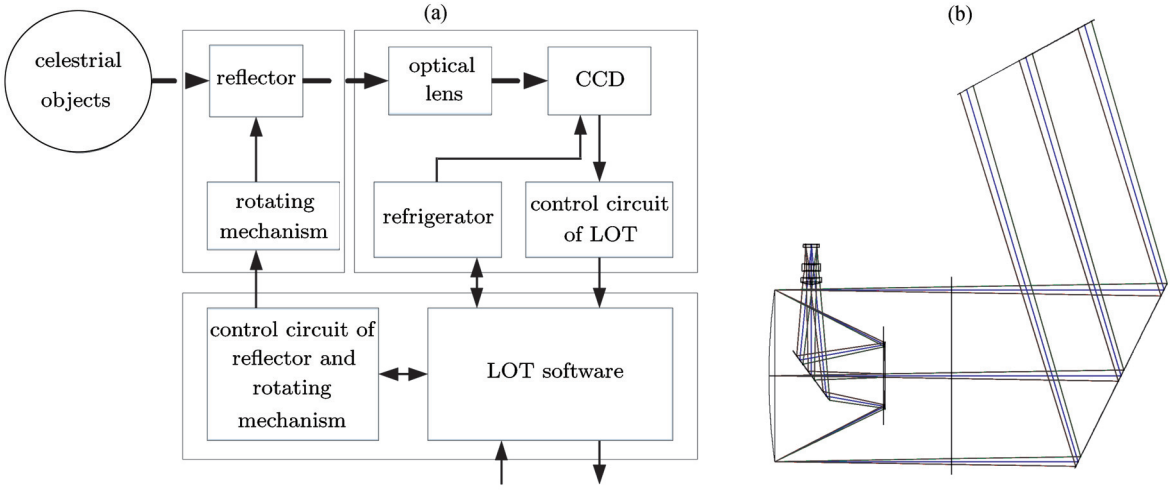


图 5 月基光学望远镜光学系统组成 (a) 及光路设计 (b)

Fig. 5 Optical system composition (a) and design of lunar optical telescope (b)

月基光学望远镜在月昼时进行观测, 虽然月球没有大气散射, 且反射镜指向与太阳光的入射方向夹角较大, 但是来自太阳的杂散光依然是月基光学望远镜背景噪声的最重要来源. 为保证系统的星像观测信噪比, 月基光学望远镜需要系统的杂散光点源透射比 (PST) 尽可能低. 月基光学望远镜安装在载荷舱内, 在其顶部开设观测窗进行观测, 利用载荷舱顶盖板遮挡太阳光, 避免太阳光直接照射到月基光学望远镜主镜筒内形成一次散射光. 月基光学望远镜内部关键表面均采用了杂散光抑制措施, 以抑制二次散射光. 月基光学望远镜校正镜组镀有滤光膜, 其在非工作波段 ($\lambda \geqslant 340\,\mathrm{nm}$) 透过率小于工作波段透过率的 5%.

根据系统设计参数, 利用杂散光分析软件中建立的全系统模型, 对杂散光评价指标 PST 进行了仿真计算, 其结果满足月基光学望远镜的设计要求 (见表 3). 月基光学望远镜技术指标列于表 4.

2.3 极紫外相机

极紫外相机的工作波长为 30.4 nm, 探测目标是地球等离子体层 He^+ 对 30.4 nm 太阳极紫外辐射的共振散射. 极紫外相机工作波长是可见光波长的 1/16, 在设计上需要实现在 30.4 nm 波段的高传输效率, 同时要求极紫外相机具有较窄的光谱带宽, 以便滤掉 58.4 nm 和 121.6 nm 等强辐射对 30.4 nm 辐射的影响.

表 3 点源透射比 (PST) 仿真计算结果

Table 3 Simulation results of Point Source Transmission (PST)

月球时	9 点	12 点	15 点
PST	4.5×10^{-10}	9.2×10^{-9}	7.4×10^{-9}

表 4 月基光学望远镜技术指标

Table 4 Technical specifications of lunar optical telescope

参数	指标
光谱范围/nm	245~340
视场角/(°)	1.36×1.36
有效像元数量/pixel	1024×1024
探测极限 (counts·s^{-1}·m^{-2})	1.13×10^5
探测不确定度	0.2 个星等 (5~13 等星)

极紫外相机由薄膜吸收滤光片、EUV 波段多层膜反射镜、光子计数成像探测器、极紫外相机支撑结构和电子学控制系统组成 (见图 6). 采用单球面反射的光学结构和球面光子计数成像探测器, 以消除单一球面成像所产生的较大像差, 在较大视场时具有好的成像质量. 通过薄膜吸收滤光片, 滤掉真空紫外、可见光和红外辐射等非成像辐射. 采用 15° 视场配合二维转动指向机构, 实现对地球等离子体层的跟踪观测, 保证地球等离子体层处于 15° 视场的中心部位.

除地球等离子体层 He^+ 对 30.4 nm 太阳极紫外辐射的共振散射外, 地球电离层、地冕中的氦原子在 58.4 nm 波段有很强的辐射, 主要分布在高度 2000 km (1.4 个地球半径处) 以下, 最高强度约 700 R (1 R = 10^{10} counts·s^{-1}·m^{-2}), 2000 km 处强度降至约 10 R. 通常 58.4 nm 的辐射会产生较强的杂散光, 极紫外相机设计时, 必须尽可能抑制该杂散光辐射, 保证获取较好的图像质量.

极紫外相机对 58.4 nm 和 121.6 nm 辐射的抑制能力主要由薄膜吸收滤光片、EUV 波段多层膜反射镜及光子计数成像探测器共同决定. Mo/Si 多层膜的典型反射率分布如图 7(a) 所示. 在 EUV 相机前端装有薄膜吸收滤光片, 该滤光片起到滤光作用, 滤

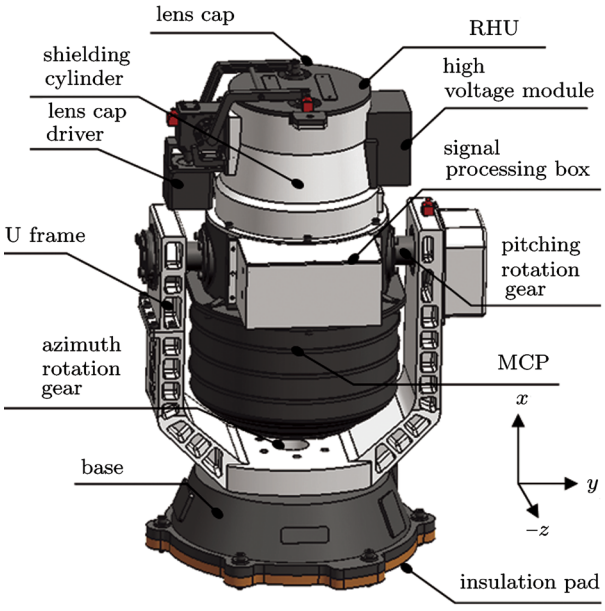


图 6 极紫外相机组成

Fig. 6 Composition of extreme ultraviolet camera

光片 30.4 nm, 58.4 nm 和 121.6 nm 处透过率分布如图 7(b) 所示. 探测器量子效率分布如图 7(c) 所示. 通过采用薄膜吸收滤光片、EUV 波段多层膜反射镜、光子计数成像探测器, 30.4 nm 对 58.4 nm 的抑制能力大于 70 倍. 滤光片在 121.6 nm 处透过率为 1.1×10^{-9}, 121.6 nm 辐射对 30.4 nm 成像影响可以忽略. 极紫外相机技术指标如表 5 所示.

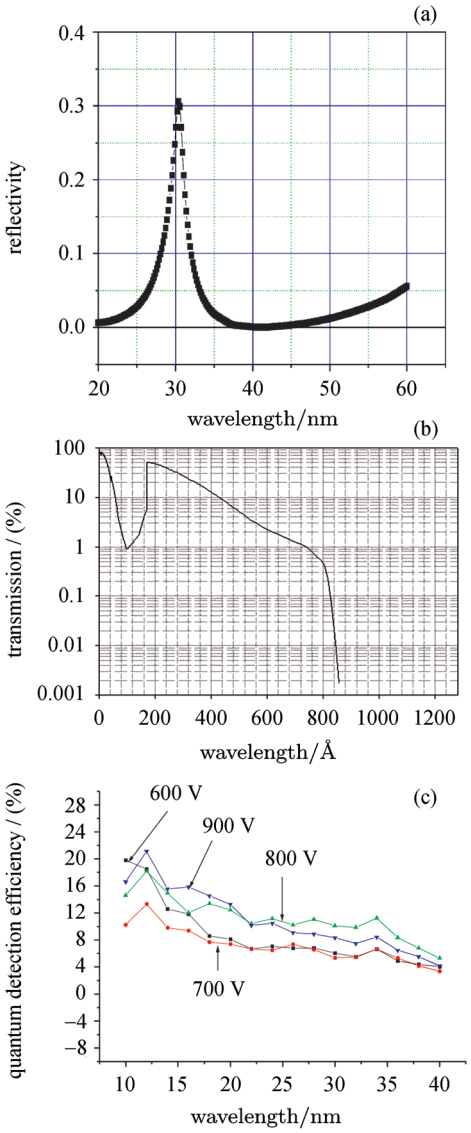


图 7 极紫外相机几种辐射抑制方式及其特性.
(a) 多层膜反射镜反射率分布, (b) 薄膜吸收滤光片透过率分布, (c) MCP 量子效率分布

Fig. 7 Radiation suppression in Extreme ultraviolet camera. (a) Reflectivity distribution of reflector, (b) transmissivity of thin-film filters, (c) MCP quantum efficiency

2.4 降落相机

降落相机安置在着陆器底部, 垂直指向月表, 主要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.

降落相机采用了光学、结构、电子学一体化设计, 根据探测需求, 选用 CMOS 图像传感器作为探测器, 其主要性能指标列于表 6.

降落相机采用了折射式光学系统的结构设计方案, 如图 8 所示.

表 5 极紫外相机主要技术指标

Table 5 Technical specifications of extreme ultraviolet camera

参数	指标
测量波段中心频点/nm	30.4
视场角/(°)	15
角分辨率/(°)	0.08
探测强度范围/R	0.1∼10
探测灵敏度/(counts·s^{-1}·R^{-1})	0.1

表 6 CMOS 图像传感器件性能参数

Table 6 Parameters of CMOS image sensor

参数	指标
有效像元数/pixel	1280×1024
像元速率 (ADC)/MHz	40
帧速率/(frame·s^{-1})	27
光谱响应范围/nm	400∼1000
量子效率 × 填充因子/(%)	⩾ 30
动态范围/dB	64

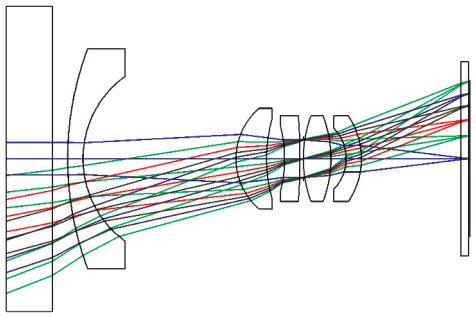


图 8 降落相机光学系统方案

Fig. 8 Optical system design of descending camera

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, 为了降低影响, 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, 着陆器水平速度在相机最大积分时间内产生的像移小于 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; 垂直速度对成像质量的影响低于 0.72%, 不会造成相机 MTF 的下降, 对相机成像质量没有影响. 降落相机能达到的技术指标列于表 7.

3 结语

Chang'E-3 着陆器配置了地形地貌相机、月基光学望远镜、极紫外相机以及降落相机共四种科学探测有效载荷, 在方案上采用了载荷电控箱高性能中心 CPU 与分布式 FPGA 相结合, 实现了集中控制和数据处理. 各有效载荷根据科学探测任务和探测目标特性分别进行了针对性设计, 主要性能指标均满足探测要求. 通过科学探测的地面模拟试验, 验证了科学探测能力.

表 7 降落相机主要技术指标

Table 7 Technical index of descending camera

参数	指标
有效像元数/pixel	1024×1024
视场角/(°)	45×45
帧频/(frame·s^{-1})	10
量化值/bit	8
MTF	0.22
信噪比 (SNR)/dB	40 (反照率 0.09, 太阳高度角 30°)

参考文献

[1] Jia Yingzhuo. System design for CE-3 Lander's payloads [R]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2011. In Chinese (贾瑛卓. CE-3 着陆器有效载荷分系统设计报告 [R]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011)

[2] Luo Zongfu, Meng Yunhe, Tang Guojian. Lunar soft-landing trajectory design based on evolutionary strategy [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(1):92-98. In Chinese (罗宗富, 孟云鹤, 汤国建. 基于进化策略的月球软着陆探测器轨道设计 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(1):92-98)

[3] Gong Dezhu, Jia Jinzhong, Liu Yang. Research of circuit system in CCD ultraviolet sensor for probing moon [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, **26**(2):132-141. In Chinese (龚德铸, 贾锦忠, 刘洋. 紫外 CCD 敏感器头部电路系统的研究 [J]. 空间科学学报, 2006, **26**(2):132-141)

[4] Wang Jie, Zeng Zuoxun, Yu Zongyu, *et al.* Research of lunar tectonic features: Primary results from Chang'E-1 lunar CCD image [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4):482-491. In Chinese (王杰, 曾佐勋, 岳宗玉, 等. 月球主要构造特征: 嫦娥一号月球影像初步研究 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4):482-491)

[5] Chen Chao, Qin Qiming, Lu Yan, *et al.* Research on photometric correction of lunar image from CCD stereo camera onboard Chang'E-1 satellite [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1):120-127. In Chinese (陈超, 秦其明, 卢燕, 等. 嫦娥一号 CCD 立体相机数据光度校正 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(1):120-127)

[6] Bell J F III, Squyres S W, Herkenhoff K E, *et al.* Mars Exploration Rover Athena Panoramic Camera (Pancam) investigation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(E12):8063, doi: 10.1029/2003 JE002070

[7] Sandel B R, Broadfoot A L, Curtis C C, *et al.* The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **91**:197-242

[8] Morris O G. Apollo 16 Mission Report [R], MSC-07230. USA: National Aeronautics and Space Administration, 1972