天问一号多光谱相机设计与在轨验证

杨建峰, 薛彬*, 赵意意*, 马小龙, 李福, 葛伟, 阮萍, 吕娟, 吕宝刚, 贺应红, 乔卫东, 卢笛

中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119

*联系人, 赵意意, E-mail: Zhaoyiyi@opt.cn; 薛彬, E-mail: Xuebin@opt.ac.cn

收稿日期: 2021-10-23; 接受日期: 2022-01-21; 网络出版日期: 2022-02-10

火星探测天问一号任务和国家自然科学基金(编号: 11941002)资助项目

摘要 中国的首次火星探测任务天问一号探测器于2020年7月23日成功发射. 多光谱相机是天问一号的重要载荷, 安装在祝融号巡视器的桅杆上, 其科学目标为获取着陆区及巡视区多光谱图像, 研究火星表面物质组成, 获取火星化学演化的基础信息. 本文介绍了天问一号多光谱相机的方案及设计结果. 基于提高可靠性考虑, 天问一号多光谱相机通过切换8个不同厚度玻璃制成的窄带滤光片, 实现多光谱成像并校正轴向色差; 通过切换6个不同厚度的调焦补偿片来实现调焦功能. 在轨工作科学数据表明多光谱相机图像清晰, 光谱数据正常.

关键词 多光谱相机, 天问一号, 火星探测

PACS: 42.15.-i, 95.55.Fw, 95.55.Pe, 96.30.Gc

1 引言

火星和地球同处太阳系内的宜居带内, 同属于岩石行星, 拥有孕育生命的可能性. 火星的潜在资源丰富, 土壤中广泛存在着部分有机物和永久冻结带^[1], 它是人类深空探测的必经之路. 火星探索的历史从一个多世纪前利用望远镜进行观测一直发展到如今的轨道器和着陆器/巡视器探测时代^[2,3]. 其中, 多光谱相机常常作为重要的载荷搭载在火星车上用于对火星表面的形貌特征及物质成分分布进行探测. 代表性载荷有火星探路者任务中的火星探路者成像仪(IMP)^[4]、火星探测漫游者任务中的全景相机(Pancam)^[5]、火星科学

实验室任务好奇号火星车上的桅杆相机(Mastcam)^[6]和火星2020任务毅力号火星车上的桅杆相机(Mastcam-Z)^[7]. 这些载荷都取得了丰硕的成果, 火星探路者成像仪获取了大量火星表面多光谱图像数据, 对这些数据的分析发现着陆区表面形貌复杂, 存在由河流、风成以及撞击等过程运输和改造的岩石所覆盖的山脊和谷, 包括三种岩石及四种土壤类型^[8]. 火星探测漫游者多光谱全景相机成功地提供了着陆巡视区域的形貌特征, 附近岩石的岩性、分布和形状等信息, 并发现了火星表面古代水环境的原位探测证据^[9,10]. 研究人员利用好好奇号火星车桅杆相机获取的数据, 发现在火星“黄刀湾”区域存在光谱差异明显的矿物, 包括含铁硅

引用格式: 杨建峰, 薛彬, 赵意意, 等. 天问一号多光谱相机设计与在轨验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 239504

Yang J F, Xue B, Zhao Y Y, et al. Design and on-orbit verification of Tianwen-1 multispectral camera (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 239504, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0294](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0294)

酸盐、铁氧化物、硫酸铁矿物以及水合矿物(如硫酸钙)^[11,12]. 通过对这些搭载在不同探测任务中多光谱相机返回数据的分析研究, 加深了对火星的地质演化历史的认识, 同时也为后续的火星探测任务奠定了基础.

天问一号是中国的首次火星探测任务, 其火星车搭载了多光谱相机、表面成分探测器、导航地形相机、次表层探测雷达、表面磁场探测器、火星气象测量仪等科学载荷^[13]. 多光谱相机安装在天问一号着陆巡视器的桅杆上, 多光谱相机的科学目标为获取着陆区及巡视区多光谱图像, 研究火星表面物质组成, 获取火星化学演化的基础信息.

2020年7月23日天问一号卫星发射, 于2021年2月到达火星附近, 实施火星捕获, 2021年5月15日实现火星软着陆, 2021年6月4日多光谱相机首次火星工作. 通过下传工程参数, 表明设备功能正常; 下传工程参数表明设备功能正常, 下传科学数据表明拍摄图像清晰、光谱数据正常. 探月与航天工程中心根据天问一号多光谱相机前期探测数据对多光谱相机科学探测数据质量进行了初步评估, 认为多光谱相机工作正常、数据格式正确、科学数据有效、图像质量优良, 能够进行稳定的数据观测、采集与下传.

2 多光谱相机的设计指标

针对天问一号多光谱相机的科学探测目标, 相机的主要功能要求包括以下7点: 能够获取巡视区高分辨率图像; 能够获得火星表面可见光、近红外波段的多光谱图像; 具有自动和遥控调节曝光的能力; 具有自动和遥控调焦的能力; 具有消减杂光的措施; 具有抗灰尘干扰功能; 具有在轨定标功能. 根据科学目标与任务要求, 天问一号多光谱相机性能指标要求如表1所示.

多光谱相机9个通道中有8个单光谱段和1个对日观测谱段. 单光谱段的设置主要考虑火星主要矿物的特征光谱, 同时兼顾光学系统设计难度. 目前火星表面探测到的主要矿物包括以下4种类型: (1) 镁铁质硅酸盐, 如斜方辉石、单斜辉石、橄榄石等; (2) 三价铁氧化物(Fe^{3+}), 如针铁矿、赤铁矿等; (3) 层状硅酸盐, 如蒙脱石、绿脱石等; (4) 硫酸盐(如石膏)和碳酸盐(如菱铁矿)等. 根据以上矿物类型, 确定多光谱相机光谱通道的中心波长、谱线半高全宽, 如表2所示.

表 1 多光谱相机总体技术指标

Table 1 Specifications of multispectral camera

序号	名称	主要参数和性能
1	颜色	多光谱
2	光谱通道 (nm)	多光谱(9个通道)
3	正常成像距离 (m)	1.5– ∞
4	有效像元数量	不小于2 K $\times$ 2 K
5	对角线视场角 ($^{\circ}$)	24
6	空间分辨率	不低于0.2 mrad
7	量化值 (bit)	10
8	信噪比S/N (dB)	≥ 40
9	系统静态传函MTF	≥ 0.2
10	视场畸变	优于1%

表 2 光谱通道选择

Table 2 Spectral channel selection

序号	中心波长 (nm)	带宽 (nm)
1	480	20
2	525	20
3	650	12
4	700	15
5	800	25
6	900	30
7	950	50
8	1000	50
9	带宽480–600 nm	

3 多光谱相机设计

3.1 多光谱相机方案选择

多光谱相机的常见实现方案有滤光片轮、焦面滤光片阵列、光可调谐滤光片(AOTF)、液晶可调谐滤光片(LCTF)等数种. 各方案的优缺点总结如表3所示. 滤光片轮多光谱相机方案具有视场大、结构较简单、谱段独立、光谱稳定等特点, 并且在国内外深空探测项目中多次应用. 鉴于多光谱相机科学需求视场较大、谱段数不多的特点, 天问一号多光谱相机选择了滤光片轮方案.

天问一号多光谱相机的成像距离指标为1.5 m到无穷远. 在CE-3全景相机任务中, 成像距离是3 m到无穷远, CE-5全景相机的成像距离为0.5 m到无穷远, 天

表 3 多光谱实现方案对比

Table 3 Comparison of multispectral imaging solutions

实现方案	优点	缺点
滤光片轮	视场大; 结构较简单; 谱段独立、光谱稳定; 有航天经历	有运动部件
焦面滤光片阵列	结构简单; 可靠性高	滤光片拼接有间隔; 需扫描获多光谱图; 处理较复杂, 需要图像配准
AOTF	谱段数多; 光谱分辨率高; 有航天经历	视场小; 光学效率低; 分光器件体积大, 质量重
LCTF	谱段数多; 光谱分辨率高	光学系统复杂, 体积大, 质量重; 光学效率低; 无航天经验

问一号的指标介于二者之间. CE-3和CE-5全景相机通过选择较大的 F 数来增大景深, 以应对远近距离目标成像的需要. 但天问一号多光谱相机光谱通道较窄, 如果选择较大的 F 数, 将导致曝光时间过长, 影响图像质量. 因此天问一号多光谱相机采取调焦机构实现了对远近距离目标成像的需求.

常用的调焦方法为镜组轴向移动, 通过镜头中单片或多片透镜的轴向移动实现对远近不同距离目标的调焦. 但其调焦机构复杂, 火星表面大温差、真空环境容易造成调焦机构卡滞、冷焊等问题, 可靠性较差. 基于提高机械可靠性这一思路, 天问一号采用旋转插入不同厚度调焦补偿镜来实现调焦功能. 其机械结构与滤光片轮相似, 可大幅提高系统可靠性. 这样调焦就变为离散步长, 设置6个离散调焦位置, 既能简化调焦算法, 提高对焦速度, 又能提高机械系统可靠性.

当 F 数增大时, 景深会迅速增大, 增大 F 数对扩大成像范围非常有效. F 数增大带来的不利因素是相机的极限传函会降低. 为了兼顾成像范围和系统传函, 多光谱相机最终选取光学系统 F 数为6.

多光谱相机的探测器选用了CMOSIS公司的CMV4000图像传感器, 像元数为 2048×2048 , 像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 量化等级为10 bit, 动态范围为60 dB.

3.2 多光谱相机光学系统设计

根据探测器像元尺寸、光学系统视场角和相对孔径及光谱范围要求, 确定了多光谱相机的光学技术指标如表4所示.

根据相机光学技术指标, 着重考虑提高整个系统可靠性出发, 对光学系统进行了优化设计, 如图1所示. 整个系统由窗口、成像镜组(4片透镜)、滤光片和调

表 4 多光谱相机光学参数

Table 4 Optical parameters of multispectral cameras

名称	主要参数和性能
光谱范围	460–1050 nm
焦距	38 mm
相对孔径	1/6
对角线全视场角	24°
畸变	优于1%

图 1 (网络版彩图)光学系统结构示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of optical system.

焦补偿镜等4部分组成. 滤光片采用薄膜干涉滤光片, 共设置9片, 如表2数据所示. 调焦补偿片共设置6组厚度不同镜片, 用于补偿不同物距产生的离焦量. 设计采用了4种光学玻璃, 其中窗口、滤光镜组及调焦镜组均采用熔石英材料, 光学系统第一镜及第四镜采用了HLAK3, 第二镜采用HLAK2, 第三镜采用HZF6材料.

由于系统工作波长为460–1050 nm, 要完全校正轴上色差, 需使用氟冕玻璃, 但这类玻璃线胀系数较大, 温度变化剧烈时容易破碎. 为了提高系统可靠性, 舍弃使用超低色散氟冕玻璃, 使用常规玻璃, 不校正二级光谱, 对残余轴向色差通过不同波段滤光片厚度变化来补偿.

火星多光谱相机要求成像距离为 $1.5 \text{ m} - \infty$, 图2分

析了对不同距离目标成像时透镜组调焦量的变化, 从图中可以看出, 相机对1.5 m- ∞ 距离的目标成像, 总调焦量约0.94 mm. 在实际工作中, 多光谱相机的拍摄目标为3 m- ∞ 的景物以及距离1.5 m的标定板, 3 m- ∞ 的景物需要每个位置的图像都清晰, 3 m以内只需要1.5 m处的标定板清晰成像, 1.5-3 m之间的景物可以不清成像. 因此6片调焦片的设置原则为第一个调焦片用于补偿在1.5 m处观测标定板时的离焦量; 其余5个调焦片用于补偿3 m- ∞ 的离焦量, 每个调焦片的离焦补偿量均匀分布, 如图2所示. 除了第一个调焦片外, 其余5个调焦片的离焦补偿量设置相差0.1 mm, 每个离焦片厚度及离焦补偿量设置如表5所示.

从图2可以看出, 调焦片厚度为离散设置, 因此在调焦过程中除了6个调焦片设置位置, 其他距离下均存在一定离焦. 在调焦过程中, 525 nm通道不同物距在奈奎斯特频率90 lp的传函变化如图3所示. 1.5 m处的MTF为0.62, 3 m- ∞ 的MTF在0.4-0.63之间变化, 满足

图 2 (网络版彩图)光学系统不同距离成像的离焦量及6片调焦片的离焦补偿量

Figure 2 (Color online) The defocus value at different distances of the optical system and the compensation value of the six focusing plates.

表 5 调焦片厚度设置表

Table 5 Thickness of focal plane compensation lens

物距 (m)	调焦量 (mm)	调焦补偿镜厚度 (mm)
1.5	0.94	2.5
3.1	0.45	4.1
4.0	0.35	4.4
5.6	0.25	4.7
9.4	0.15	5.0
28.1	0.05	5.3

任务需求. 其他各通道MTF随物距变化情况与525 nm通道相当, 此处不再列出.

3.3 多光谱相机机械结构设计

整个多光谱相机分为镜头组件、调焦轮组件、滤光轮组件、焦面组件及壳体组件, 如图4所示.

镜头组件选用刚度高、热膨胀系数小的钛合金, 支撑壳体选择铝合金及镁合金. 多光谱相机的运动机构包括调焦轮组件及滤光轮组件, 滤光轮组件及调焦轮组件均由驱动步进电机、小齿轮、大齿轮、轴承、轴承内圈压板、轴承外圈压环、滤光片或调焦片、压圈和位置霍尔等部分组成, 滤光轮组件及调焦轮组件均安装在主支撑板上, 如图5所示. 霍尔组件用于位置检测和零位校准.

图 3 调焦过程中不同距离下MTF的变化

Figure 3 Changes of MTF at different distances during focusing.

图 4 (网络版彩图)多光谱相机结构组成. (a) 镜头组件; (b) 调焦轮组件; (c) 滤光轮组件; (d) 焦面组件; (e) 壳体组件

Figure 4 (Color online) Multispectral camera structure. (a) Lens assembly; (b) focus wheel assembly; (c) filter wheel assembly; (d) focal plane assembly; (e) housing assembly.

图 5 (网络版彩图)多光谱相机运动机构组成

Figure 5 (Color online) Multispectral camera motion mechanism composition.

滤光轮组件及调焦轮组件的驱动模式采用步进电机带动小齿轮,小齿轮驱动大齿轮的转动模式.主支撑板和大齿轮选用铝合金材料,考虑到火星中的低气压环境,为了防止运动部件发生冷焊现象,小齿轮材料选用与大齿轮不同的不锈钢材料.同时由于材料不同,膨胀系数不同,在大小齿轮装配时需要留有一定的热膨胀间隙,防止齿轮间卡死,并且所有运动机构零件的接触表面通过溅射 MoS_2 实现固体润滑.为了增加大齿轮的耐磨性,大齿轮表面进行了镀镍处理.主滤光轮组件的传动比为1:9,调焦轮组件的传动比为1:6.

3.4 标定板设计

标定板的作用是完成多光谱相机星上定标,解决绝对反射率反演和彩色重建问题.标定板主要由以下7个部分组成:白灰黑三个环形标定板、红色色卡、绿色色卡、蓝色色卡、黄色色卡、投影日晷和环形抛光铝板,设计如图6所示.标定板与多光谱相机距离为1.5 m,根据多光谱相机的视场大小,确定标定板的大小为60 mm×60 mm×30 mm.

白灰黑三块标定板制作成如图6所示的三个同心圆状的环形标定板.三个环形标定板均为朗伯体,其反射率因子分别为60%,40%,20%,且各向同性,同一个标定板不同波段的反射率误差在10%以内.

当多光谱相机在火星表面工作时,用测得的红色、绿色、蓝色及黄色四块色卡的光谱与它们在地面实测的光谱数据作比对,可对火星多光谱相机进行光谱定标,确定火星多光谱相机在轨工作测量数据的准

图 6 (网络版彩图)标定板设计图. (a)–(c) 黑灰白三个环形标定板; (d)–(g) 红色色卡、绿色色卡、蓝色色卡、黄色色卡; (h) 投影日晷; (i) 环形抛光铝板

Figure 6 (Color online) Calibration board design drawing. (a)–(c) are 3 circular standard plates in black, gray and white; (d)–(g) are red color card, green color card, blue color card, and yellow color card, respectively; (h) is a projection sundial; (i) is a circular polished aluminum plate.

确度.也可利用此四种色卡在进行彩色合成时作为标准色卡.其中两种色卡上喷涂的矿物(赤铁矿和针铁矿)为火星表面实际存在的矿物.在轨工作时,多光谱相机测得此两种色卡的光谱与火星表面地物光谱进行对比分析,帮助判定火星表面的矿物成分.

四种色卡的散射特性接近朗伯体,且地面对四个色卡的BRDF进行了测量,获得了每一个色卡在每一个设计波长处,在不同光照几何条件下的反射率因子.

在白灰黑同心圆状标定板中心竖起一根顶端成圆球状的杆体,称其为投影日晷.设置该投影日晷的主要目的是使其遮挡住直射的太阳光,在白灰黑标定板上留下阴影.虽然直射太阳光被日晷挡住,但阴影处仍然可以接收到来自火星天空的杂散光.因此,可以通过对标定板照亮部分和阴影部分辐亮度值的分析,得到太阳直射光和天空杂散光的比例,为后续计算地物反射率因子时进行天空杂散光校正提供数据基础.日晷全部要喷涂吸光材料,保障照射到其上的光全部被吸收,以避免其散射光对标定板上的光强度产生影响.

环形抛光铝板为抛光的铝板,用来反映火星天空的颜色.

多光谱相机标定板内部放置了13个磁环,磁环设计旨在磁环中心上方产生一个向上的磁场梯度,这会

对磁性粒子(如火星风尘颗粒)产生向上的力, 减少磁环中心灰尘的沉积. 其中, 白、灰、黑标定板下各放置3个磁环, 红、绿、蓝、黄色卡下各放置1个磁环.

4 在轨工作情况

如图7和8所示为交付的天问一号多光谱相机和标定板产品. 自2021年6月4日(第21个火星日), 多光谱相机开机开始采集科学数据, 7–10天采集一次数据, 截至8月16日, 共采集13次, 通过对工程参数及图像数据判读, 设备工作正常. 通过对图像帧头参数判读, 数据完整; 对图像质量判读, 图像清晰, 纹理丰富, 色彩真实,

数据质量较好.

如图9所示为天问一号多光谱相机在轨拍摄的标定板图像. 彩色图像采用第三通道、第二通道、第一通道作为R, G, B分量生成^[14]. 由图像可以看出, 标定板表面磁环放置位置有明显的环状尘埃聚集, 这是由于磁环将落在磁环中心的尘埃排斥到了磁环的周边. 采用白色标定板修正获得4个彩色标定块的反射率光谱数据, 与地面测定的标定板反射率数据对比基本一致, 如图10所示.

如图11所示为多光谱相机拍摄的火星表面图像, 图12为采用I/F反射率法获取的图11中红色方框内火星表面的反射率数据. I/F反射率法为将每一个光谱通

图 7 (网络版彩图)交付的多光谱相机产品
Figure 7 (Color online) Delivered multispectral camera products.

图 8 (网络版彩图)交付的标定板产品
Figure 8 (Color online) Delivered calibration board products.

图 9 (网络版彩图)多光谱相机在轨拍摄的标定板图像
Figure 9 (Color online) Calibration plate image taken by the multispectral camera on Mars.

图 10 (网络版彩图)多光谱相机在轨拍摄的标定板光谱反射率数据与地面测量数据对比(R', G', B', Y'分别为标定板红黄蓝绿四个色块在轨测得的光谱反射率数据, R, G, B, Y为标定板红黄蓝绿四个色块在地面测得的光谱反射率数据)

Figure 10 (Color online) Comparison of the spectrum data of the calibration board on the orbit and the ground measurement data (R', G', B' and Y' are the spectral reflectance data of the four color blocks of red, green, blue and yellow on the calibration plate measured by the multispectral camera on Mars. R, G, B, and Y are the spectral reflectance data of the four color blocks of red, green, blue and yellow on the calibration plate measured on the ground).

图 11 (网络版彩图)多光谱相机拍摄的火星表面图像
Figure 11 (Color online) Image of the surface of Mars taken by the multispectral camera.

图 12 (网络版彩图)多光谱相机获取的光谱反射率曲线(图 11 中红色方框内火星表面土壤)
Figure 12 (Color online) The spectral reflectance curve obtained by the multispectral camera (the surface of Mars in the red box in Figure 11).

道图像的DN值按绝对定标系数转换为对应谱段的光谱辐亮度,除以同一谱段的火星大气外太阳光谱辐射度,从而得到每一通道的反射率.图13对比了多光谱

图 13 (网络版彩图)多光谱相机获取的光谱反射率曲线(图 11 场景中的平均光谱反射率)与CRISM在轨道获取的天问一号着陆区光谱反射率曲线对比

Figure 13 (Color online) Comparison of the spectral reflectance curve obtained by the multispectral camera (the average spectral reflectance in the scene in Figure 11) and the spectral reflectance curve of the Tianwen-1 landing zone obtained by CRISM in orbit.

相机获取的图11场景中的平均光谱反射率曲线和美国火星勘测轨道器成像光谱仪(CRISM)在轨道上获得的天问一号着陆区光谱反射率曲线(数据ID: T1328_mrrif_25n107_0256_1, 采集时间2008年12月09日),两者基本符合.

5 讨论与结论

天问一号着陆巡视器有效载荷多光谱相机采用了简化的四片透射式光学结构,通过滤光片轮切换8个不同厚度玻璃制成的窄带滤光片,实现多光谱成像并校正轴向色差;通过调焦轮切换6个不同厚度的调焦补偿片来实现调焦功能,在1.5 m-∞距离清晰成像.多光谱相机机械结构采用铝合金、钛合金、镁合金等材料的有机配合实现轻量化和高可靠性.其运动组件由步进电机驱动,利用霍尔元件实现零位标校.多光谱相机配有标定板,标定板分为9个部分,用于星上标定.

多光谱相机在轨拍摄的标定板图像和火星表面图像表明多光谱相机图像清晰,纹理丰富,色彩真实;在轨拍摄的标定板光谱数据与地面测量数据对比一致;采用I/F反射率法获取的火星表面反射率数据与CRISM在轨道上获得的光谱数据基本符合.在轨工作科学数据表明多光谱相机工作正常、数据格式正确、科学数据有效、图像质量优良,能够进行稳定的数据观测、采集与下传.

参考文献

- 1 Ouyang Z Y, Xiao F G. The Mars and its environment (in Chinese). *Spacecraft Environ Eng*, 2012, 29: 591–600 [欧阳自远, 肖福根. 火星及其环境. *航天器环境工程*, 2012, 29: 591–600]
- 2 Hoffman S J. Human Exploration of Mars: The Reference Mission of the NASA Mars Exploration Study Team. Technical Report, National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center, 1997
- 3 Yu D Y, Sun Z Z, Meng L Z, et al. The development process and prospects for Mars exploration (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2016, 3: 108–113 [于登云, 孙泽洲, 孟林智, 等. 火星探测发展历程与未来展望. *深空探测学报*, 2016, 3: 108–113]
- 4 Smith P H, Bell J F I, Bridges N T, et al. Results from the Mars Pathfinder camera. *Science*, 1997, 278: 1758–1765
- 5 Bell J F III, Squyres S W, Herkenhoff K E, et al. Mars exploration rover Athena panoramic camera (Pancam) investigation. *J Geophys Res*, 2003, 108: 8063
- 6 Malin M C, Ravine M A, Caplinger M A, et al. The Mars Science Laboratory (MSL) mast cameras and descent imager: Investigation and instrument descriptions. *Earth Space Sci*, 2017, 4: 506–539
- 7 Bell J F III, Maki J N, Mehall G L, et al. The Mars 2020 perseverance rover mast camera zoom (Mastcam-Z) multispectral, stereoscopic imaging investigation. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 24
- 8 Smith P H, Tomasko M G, Britt D, et al. The imager for Mars Pathfinder experiment. *J Geophys Res*, 1997, 102: 4003–4025
- 9 Bell J F III, Squyres S W, Arvidson R E, et al. Pancam multispectral imaging results from the Opportunity Rover at Meridiani Planum. *Science*, 2004, 306: 1703–1709
- 10 Squyres S W, Grotzinger J P, Arvidson R E, et al. *In situ* evidence for an ancient aqueous environment at Meridiani Planum, Mars. *Science*, 2004, 306: 1709–1714
- 11 Vaniman D T, Bish D L, Ming D W, et al. Mineralogy of a mudstone at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars. *Science*, 2014, 343: 1243480
- 12 Wellington D F, Bell James F I, Johnson J R, et al. Visible to near-infrared MSL/Mastcam multispectral imaging: Initial results from select high-interest science targets within Gale Crater, Mars. *Am Miner*, 2017, 102: 1202–1217
- 13 Zou Y, Zhu Y, Bai Y, et al. Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission. *Adv Space Res*, 2021, 67: 812–823
- 14 Wang H, Yang J F, Xue B, et al. Method for obtaining truth color values based on relative spectral power distribution of light source (in Chinese). *Spectroscopy Spectral Anal*, 2018, 38: 877–882 [王红, 杨建峰, 薛彬, 等. 基于光源相对光谱功率分布的颜色真值获取方法. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38: 877–882]

Design and on-orbit verification of Tianwen-1 multispectral camera

YANG JianFeng, XUE Bin^{*}, ZHAO YiYi^{*}, MA XiaoLong, LI Fu, GE Wei, RUAN Ping, LV Juan, LV BaoGang, HE YingHong, QIAO WeiDong & LU Di

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China

China's first Mars exploration mission Tianwen-1 was successfully launched on July 23, 2020. The multispectral camera is an essential payload of Tianwen-1 and is installed on the mast of the Zhurong rover. The scientific goals of the mission are to obtain multispectral images of the landing and inspection zones, investigate the surface material composition on Mars, and obtain basic information on the chemical evolution of Mars. This article introduces the scheme and design results of the Tianwen-1 multispectral camera. To improve reliability, Tianwen-1 realizes multispectral imaging and corrects axial chromatic aberration by switching eight narrow-band filters with different thicknesses, and achieves focusing function by switching six focus compensation lenses of different thicknesses. The scientific data of on-orbit work shows that the image is clear and the spectral data are normal. The spectral reflectance data of the calibration board taken by the multispectral camera on Mars are consistent with the ground measurement data. The spectral reflectance data of the Martian surface obtained by the multispectral camera are basically consistent with the spectral reflectance data obtained by the Mars Reconnaissance Orbiter Imaging Spectrometer (CRISM) in orbit.

multispectral camera, Tianwen-1, Mars exploration

PACS: 42.15.-i, 95.55.Fw, 95.55.Pe, 96.30.Gc

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0294](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0294)