天问一号中分辨率相机的设计与验证

余国彬^{1,2*}, 刘恩海^{1,2}, 刘光林^{1,2}, 周黎^{1,2}, 曾骏哲^{1,2}, 陈元培^{1,2}, 周向东^{1,2}, 赵汝进^{1,2}, 朱顺一^{1,2}

1. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室, 成都 610209;

2. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209

*联系人, E-mail: ygb@ioe.ac.cn

收稿日期: 2021-10-29; 接受日期: 2022-01-26; 网络出版日期: 2022-02-17

摘要 中国首次火星探测任务天问一号实现火星环绕和着陆巡视, 开展火星全球性和综合性探测, 并对火星表面的重点地区进行精细巡视勘察. 中分辨率相机是搭载在环绕器上的主要科学载荷之一, 其科学探测任务是对火星表面进行成像, 绘制火星全球遥感影像图, 进行火星地形地貌及其变化的探测, 包括火星表面成像、火星地质构造和地形地貌研究. 中分辨率相机在设计上采用了轻小型的一体式设计, 主要由光学镜头、焦面组件、相机控制组件、电源与接口组件、相机支撑组件、热控组件和基准组件组成. 在定标上开展了辐射定标、颜色定标和几何定标, 保证相机能真实、正确地获取火星表面的探测数据. 本文介绍了中分辨率相机的探测任务、系统组成、工作原理、地面定标试验及结果, 为科学数据处理及应用提供参考.

关键词 火星探测, 中分辨率相机, 系统组成, 工作原理, 定标试验

PACS: 07.07.Df, 07.60.-j, 07.68.+m

1 引言

中国首次火星探测将一次实现“环绕、着陆、巡视”三个工程目标, 开展火星全球性和综合性探测, 并对火星表面的重点地区进行精细巡视勘察. 中国首次火星探测任务由火星环绕探测器(以下简称环绕器)和火星着陆巡视探测器(以下简称着陆巡视器)组成^[1,2]. 中国首次火星探测器任务的科学目标和科学任务^[3-7]主要为: (1) 研究火星形貌与地质构造特征及其变化; (2) 研究火星表面土壤特征与水冰分布; (3) 研究火星表面物质组成; (4) 研究火星大气电离层及表面气候与

环境特征; (5) 研究火星物理场与内部结构. 环绕器主要科学任务: (1) 火星大气电离层分析及行星际环境探测; (2) 火星表面和地下水冰的探测; (3) 火星土壤类型分布和结构探测; (4) 火星地形地貌特征及其变化探测; (5) 火星表面物质成分的调查和分析.

中分辨率相机是搭载在环绕器上的主要科学载荷之一, 为了适应相机体积、重量、功耗等指标要求和保证相机的几何定标精度, 中分辨率相机在设计上采用了畸变小、曝光时间易控的面阵彩色成像传感器沿轨道方向步进画幅式凝视成像方案, 实现了轻小型的一体化设计. 中分辨率相机具有以下4方面成像优点:

引用格式: 余国彬, 刘恩海, 刘光林, 等. 天问一号中分辨率相机的设计与验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 239505

Yu G B, Liu E H, Liu G L, et al. Designing and validation of moderate-resolution camera of Tianwen-1 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 239505, doi: [10.1360/SSPMA-2021-0297](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0297)

(1) 彩色成像传感器与信号处理电路结合在一起, 将其设置在光学系统焦平面上, 由电子扫描机构取代了传统光机扫描机构, 从而显著改善了系统的响应特性, 简化了系统结构, 减小了体积和质量, 结构紧凑, 提高了系统的可靠性, 使系统设计的水平提高到了更高的层次上; (2) 成像效率高, 且畸变小, 原因是整幅图像几乎是同时获取的; (3) 凝视成像能够提供较长的积分时间, 有益于提高信噪比; (4) 各帧图像之间的时间间隔只受积分时间、数据采集速率和数据传输能力的限制, 因而可以达到很高的时间分辨率。

为了提高首次火星探测任务的科学探测成果, 中分辨率相机在地火转移段择机对火星进行了成像; 在火星停泊段择机对近火点、预选着陆区进行了(三维)成像, 对着陆点进行探测和研究; 在中继轨道段择机对近火点、实际着陆点进行(三维)成像, 为火星车科学计划制定、着陆区综合研究提供支持. 在遥感使命轨道段中分辨率相机采用拍摄间隔随轨道高度和星下点速度变化的拍摄策略, 能够保证沿火星探测器飞行方向相邻两幅图像的图像重叠率达到60%, 相邻轨道间图像的重叠率达到15%, 从而能够很好地完成绘制火星全球遥感影像图。

2 相机的科学探测目标、功能、性能

环绕器有效载荷中分辨率相机将和其他载荷相互配合, 共同完成首次火星探测任务中环绕器的火星地形地貌特征及其变化探测的科学任务. 中分辨率相机的主要科学探测任务: (1) 对火星表面进行成像, 绘制火星全球遥感影像图; (2) 进行火星地形地貌及其变化的探测, 包括火星表面成像、火星地质构造和地形地貌研究。

中分辨率相机具备主要功能指标: (1) 能够获取火星表面中分辨率彩色影像; (2) 具备自动曝光和遥控调节曝光能力; (3) 具有消减杂散光的措施; (4) 具有抽样和开窗能力; (5) 太阳高度角不小于 10° 时, 具备成像能力; 太阳高度角不小于 5° 时, 力争具备成像能力。

在火星探测器发射段、捕获轨道段, 中分辨率相机不工作; 在火星探测器地火转移轨道段、停泊轨道段、中继轨道段和遥感使命轨道段, 中分辨率相机择机工作, 其主要技术性能指标如表1所示, 其工作模式有待机模式和拍照模式两种. 待机模式: 中分辨率相机

表 1 主要技术性能指标

Table 1 Main technical performance indicators

序号	项目	主要参数和性能
1	颜色	彩色(标准RGB)
2	波段范围	可见光
3	地元分辨率	98 m@400 km
4	成像幅宽	401 km@400 km
5	有效像元数量	4096×3072
6	视场角	53.3°×41.2°
7	量化值 (bit)	12
8	信噪比S/N (dB)	51.9 (目标反射率0.2, 太阳高度角30°)
9	系统静态传函MTF	≥0.37 (全视场)
10	数据压缩比	不压缩、3×压缩、4×压缩、6×压缩(缺省)、12×压缩
11	重量 (kg)	3.5
12	功耗 (W)	19.72

一次工作电源工作, 相机相关热控电路处于加电状态, 热控组件处于工作状态; 拍照模式: 中分辨率相机一次工作电源工作, 相机的热控电路、成像电路处于工作状态, 热控组件处于工作状态。

3 工作原理与系统设计

3.1 系统组成

中分辨率相机采用轻小型的一体化结构^[8], 中分辨率相机安装在环绕器上, 相机光轴指向火心, 部分光学镜头露在舱外. 中分辨率相机的主要硬件功能模块由光学镜头、焦面组件、相机控制组件、相机支撑组件、电源与接口组件、热控组件和基准组件组成. (1) 光学镜头: 有效获取火星表面的光学信号; (2) 焦面组件: 进行光电转换, 将相机光学系统获取的光学图像转换为对应的电信号, 从而得到数字图像; (3) 相机控制组件: 产生焦平面单元CMOS偏置电压; 产生焦平面单元CMOS的驱动时序信号; 通过SPI口与CMOS通信, 对其进行参数配置和读取; 接收焦平面单元CMOS输出的图像信号, 解析出图像并缓存; 根据图像进行自动曝光计算, 控制曝光; 按规定格式输出图像数据流和工程参数; 通过RS422接口与环绕器载荷控制器通信, 接收控制指令和参数, 反馈工作状态; (4) 相机支撑组件: 固定光学镜头、焦面组件和相机控制组件等,

保证相机的力学特性; (5) 电源与接口组件: 提供相机工作和热控所需要的电源和实现同环绕器载荷控制器的对接; (6) 热控组件: 保证相机的工作环境温度和存储环境温度; (7) 基准组件: 提供相机的安装基准. 中分辨率相机的软件只有一个相机控制及图像处理FPGA.

3.2 工作原理

中分辨率相机采用了畸变小、曝光时间易控的步进画幅式成像方案, 中分辨率相机的光学镜头收集火星表面上视场范围内的目标图像的光学信息, 成像在CMV12000彩色传感器靶面, CMV12000彩色成像传感器将光学信息转换成原始图像数据, 原始图像数据的分辨率为 4096×3072 , 量化值为12 bit, 单幅图像数据量为144 Mbit. CMV12000彩色成像传感器以125 Mbps传输速率向外部SDRAM传送原始图像数据, 相机控制及图像处理FPGA从外部SDRAM中读取原始图像数据首先进行全幅或开窗或抽样处理, 随后以8 B/10 B编码方式对原始图像数据进行编码, 最后读取图像的曝光起始时刻、时间信息和相机工作状态等信息打包到图像数据中一并以16 Mbps传输速率向环绕器载荷控制器传输图像数据流. 环绕器载荷控制器对全幅图像进行压缩处理, 对于开窗图像数据和抽样图像数据不进行压缩处理. 相机控制及图像处理FPGA的自动曝光功能模块以4帧/秒的频率进行自动曝光计算, 曝光时间的调整量由计算得到的当前帧图像平均灰度值与期望灰度值之差来确定, 当灰度差较大时, 采用较大的曝光时间调整量, 提高收敛速度; 当灰度差较小时, 用较小的曝光时间调整量进行微小调节. 中分辨率相机控制信号包括环绕器载荷控制器2路OC遥控指令信号和RS422串口通信信号. 相机与环绕器载荷控制器通过RS422串口通信, 实现对相机的控制、数据注入、工程参数采集等功能. 环绕器载荷控制器发送的数据包由相机内部的相机控制及图像处理FPGA接收和处理, 相机控制及图像处理FPGA再根据内容将数据或指令转发给相关电路模块, 实现对相机工作模式的控制和参数的注入. 同时, 相机的工作状态也由相机控制及图像处理FPGA进行采集, 形成数据包发送给环绕器载荷控制器. 相机控制及图像处理FPGA通过SPI接口与CMV12000彩色成像传感器通信, 发送与CMV12000彩色成像传感器相关的指令和参数.

3.3 系统设计

3.3.1 探测器选择

根据相机功能、性能指标要求以及火星光照环境、温度环境和辐照环境进行分析, 中分辨率相机的成像传感器选择为CMOSIS公司的CMV12000彩色成像传感器. 其主要性能参数: 光谱响应范围为350–900 nm, 有效像元数为 4096×3072 , 像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 灵敏度为 $4.64 \text{ V lux}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ADC为12 bit, 满阱电荷为13500e, PRNU: <1.27% (RMS), 动态范围: 60 dB, QE*FF: 50% @550 nm, 工作温度为 -30°C – 70°C .

3.3.2 光学系统及光学镜头设计

适应火星的特殊空间辐射、极冷极热温度环境和光照环境, 是中分辨率相机必须面临的考验, 也是中分辨率相机“看得见”“看得清”“看得真”的前提. 如果措施不当, 火星空间辐照会导致光学镜头透过率严重下降, 进而致使中分辨率相机无法正常工作. 光学系统采用了辐照环境适应性设计技术, 光学材料全部选用抗辐照材料, 确保了中分辨率相机的“看得见”. 同时, 环绕器舱内外温度变化剧烈, 光学镜头需要承受 -180°C – 80°C 的极限温度冲击, 光学镜头还需要在 5°C – 35°C 温度范围内的真空热环境下正常工作. 通过先进的设计方法, 让光学镜头适应了特殊温度环境, 保证了良好的成像质量, 确保了中分辨率相机的“看得清”. 如何拍摄出火星“真颜色”的彩色照片, 是摆在设计人员面前的一大难题. 经过反复思考、计算和试验验证, 最终确定了光学镜头截止波段范围, 确保了中分辨率相机的“看得真”.

中分辨率相机光学系统的主要技术参数: 波段范围为430–690 nm, 视场为 $53.1^\circ \times 41.1^\circ$, 通光口径为4.5 mm, 焦距为22.52 mm, F 数为5, 传递函数MTF为大于0.45, 光谱透过率为大于70%, 带外抑制比: 在波长小于350–410 nm时, 滤光片正入射平均透过率 $\tau_1 \leq 2\%$; 在波长大于710–1000 nm时, 滤光片正入射平均透过率 $\tau_2 \leq 2\%$, 工作温度为 5°C – 35°C . 光学系统结构示意图、光学系统的传递函数曲线和畸变曲线分别如图1–3所示, 光学镜头结构设计如图4所示.

3.3.3 相机结构设计

中分辨率相机在结构设计时主要考虑了以下4点:

图 1 光学系统结构图

Figure 1 Structure diagram of the optical system function.

图 4 光学镜头结构设计示意图

Figure 4 Structural design diagram of optical lenses.

图 2 光学传递函数曲线

Figure 2 Optical modulation transfer curve.

图 3 光学系统畸变曲线

Figure 3 Distortion curve of the optical system.

- (1) 满足发射、转移、分离的力学环境条件要求; (2) 满足光学系统成像质量要求; (3) 满足轻量化、小型化结构设计要求; (4) 满足相机热控条件要求. 中分辨

率相机由光学镜头、焦面组件、相机控制组件、电源与接口组件、相机支撑组件、热控组件和基准组件等组成. 根据焦面组件与光学镜头的关系, 焦面组件垂直于光学镜头, 相机控制组件、电源与接口组件平行布置于电路箱体. CMOS彩色成像传感器的背面采用特殊的铜条导热装置和导热途径将CMOS彩色成像传感器工作时产生的热传递到相机机械结构, 解决了大功率CMOS彩色成像传感器散热困难的问题, 从而保证了CMOS彩色成像传感器与相机机械结构的良好温差, 实现了CMOS彩色成像传感器到相机机械结构之间的温差为 5°C , 让中分辨率相机具有能够在 -180°C – 80°C 的高温工作环境中工作的能力.

中分辨率相机结构设计具有的特点: (1) 采用CMOS电路板与光学镜头模块化设计, 保证了CMOS彩色成像传感器与光学镜头之间的相对位置固定; (2) 通过CMOS电路板与光学镜头模块化设计与装配工艺, 保证光学系统光轴与CMOS彩色成像传感器之间的垂直度误差不大于 0.01 mm ; (3) 通过模块化设计与装配工艺, 保证光轴与基准镜之间的误差不大于 $1'$; (4) 通过模块化设计与装配工艺, 保证探测器像元与安装面之间的平行度(垂直度)误差不大于2个像素. 相机结构设计示意图如图5和6所示.

4 地面定标试验及结果

4.1 辐射定标试验及结果

辐射定标的目的是为了消除中分辨率相机由于自身缺陷造成的各像元的响应不一致性, 避免各像元在入射光照均匀一致时的输出灰度值出现不相等的情况, 并建立相机输出信号与具有实际物理意义的输入辐射量之间的函数关系. 辐射定标包括相对辐射定标

图 5 CMOS电路板与光学镜头模块化设计示意图
Figure 5 Schematic diagram of CMOS circuit board and optical module modular design.

图 6 相机结构设计三维图
Figure 6 Three-dimensional diagram of camera structural design.

和绝对辐射定标^[9].

在相对辐射定标试验过程中, 用6种曝光时间(5, 10, 15, 20, 30, 40 ms)分别采集了10种温度(-20, -10, 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50°C)下的中分辨率相机图像进行暗电流定标; 用6种曝光时间(5, 10, 15, 20, 30, 40 ms)分别采集了5种均匀光照(729.65, 321.50, 1260.23, 1937.00, 196.93 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$)下的中分辨率相机图像进行响应非均匀性定标, 经相对辐射定标后中分辨率相机RGB三通道的图像非均匀性最大值为: R, G, B=[1.79%, 1.78%, 2.09%].

在绝对辐射定标试验过程中, 4种饱和度(80%, 60%, 40%, 20%)分别采集了5种均匀光照(729.65, 321.50, 1260.23, 1937.00, 196.93 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$)下的中分辨率相机图像进行绝对辐射定标, 经绝对辐射定标后中分辨率相机最大绝对辐射定标误差为2.92%.

4.2 颜色定标试验及结果

针对中分辨率相机所采用的CMV12000彩色成像

传感器的彩色光谱响应函数与CIE标准观察者色匹配函数的不一致性, 以及火星表面环境光照条件对相机彩色响应性影响, 导致中分辨率相机图像出现偏色问题, 设计了一种彩色定标与白平衡相结合的两步颜色校正方法^[10,11]. 首先在D65标准光源下, 针对CMV12000彩色成像传感器彩色光谱响应与CIE标准色匹配函数偏差, 利用24色彩色色标最小二乘平差获取RGB彩色系统下相机彩色校正矩阵(表2), 校正了相机色彩光谱响应与CIE标准观察者色匹配函数的不一致性; 其次也在D65标准光源下, 采用3阶中性色标最小二乘平差获取相机白平衡校正矩阵(表2), 改进了传统单一色标白平衡校正系数泛化能力不足的缺点, 有效降低火星表面环境光照条件对相机图像色彩的影响.

经过彩色定标和白平衡后的地面试验色彩校正如图7所示, 在D65标准光源下, 色标色彩均得到明显还原, 更加真实, 符合色标的真实色彩, 与人眼所见色彩更加一致.

4.3 几何定标试验及结果

中分辨率相机几何定标主要包含相机焦距、像主点位置以及相机畸变校正系数. 采用网格图像法, 在相机标校场使中分辨率相机在两个以上不同方位拍摄同一标校靶标, 利用中分辨率相机所拍摄的标校靶标中的标识点坐标与全站仪测量数据之间的数学约束关系, 从而解算出中分辨率相机主点、焦距、畸变校正系数(表3), 利用表3所示的畸变校正系数对中分辨率相机拍摄图像进行畸变校正, 校正后X方向残差为0.167像素, Y方向残差为0.175像素.

5 在轨初步探测结果

2020年7月23日长征五号遥四运载火箭从海南文昌出发, 把天问一号送入了奔火的轨道, 开始了真正的

表 2 彩色校正矩阵和白平衡校正矩阵

Table 2 Color correction matrix and white balance correction matrix

彩色校正矩阵	白平衡校正矩阵(R:G:B)
1.2600 0.1925 -0.5524	
-0.2958 1.3606 -0.2652	1.0482 0.9398 1.0189
0.0358 -0.5531 1.8177	

表 3 几何定标结果

Table 3 Results of geometric calibration

序号	项目	参数
1	主点 X_0 /幅宽(pixel size)	2054.4509/4096
2	主点 Y_0 /幅宽(pixel size)	1575.7622/3072
3	焦距 f (pixel size)	4097.3579
4	径向畸变系数 K_1	$3.055997990 \times 10^{-9}$
5	径向畸变系数 K_2	$-4.744987862 \times 10^{-16}$
6	偏心畸变系数 P_1	$2.385176550 \times 10^{-8}$
7	偏心畸变系数 P_2	$3.285174808 \times 10^{-9}$
8	非正方形比例系数 α	$2.417221439 \times 10^{-5}$
9	非正交性畸变系数 β	$1.125511817 \times 10^{-4}$

“天问”之旅. 2021年3月, 中分辨率相机在距离火星表面2000多千米到300多千米对着陆区进行了拍摄, 如图8和9所示, 图像中火星表面纹理清晰, 为天问一号成功着陆提供了决策依据, 有力地保障了天问一号的成功着陆.

6 结论

中分辨率相机是中国首次火星探测任务环绕器的主要有效载荷, 实现对火星表面进行成像, 绘制火星全球遥感影像图; 进行火星地形地貌及其变化的探测, 包括火星表面成像、火星地质构造和地形地貌研究. 为了保证中分辨率相机能真实、正确地获取火星的探测数据, 在中分辨率相机研制过程中进行了地面检测、环境模拟试验和地面定标试验, 为中分辨率相机所获取的科学数据处理及应用提供了参考.

图 7 在暗室D65标准光源下拍摄3阶中性色标和24色彩色色标颜色定标前后的图像效果对比(颜色定标前的色差值为31.3, 颜色定标后的色差值为8.1) (左图为颜色定标前图像, 右图为颜色定标后图像)

Figure 7 Contrast between image effects of photographing three-order neutral color codes and 24-color codes before and after color calibration under the D65 standard light source in a darkroom (The chromatic aberrations before and after color calibration are respectively 31.3 and 8.1. The left is the image before the color calibration and the right is the image after color calibration).

图 8 中分辨率相机在轨拍摄火星表面定标前后的图像效果对比(颜色定标前的色差值为30.2, 颜色定标后的色差值为1.8) (左图为颜色定标前图像, 右图为颜色定标后图像)

Figure 8 Contrast between image effects of photographing of the moderate-resolution camera imaging the surface of Mars (The chromatic aberrations before and after color calibration are respectively 30.2 and 1.8. The left is the image before the color calibration and the right is the image after color calibration).

图 9 中分辨率相机拍摄着陆区定标前后的图像效果对比(颜色定标前的色差值为31.5, 颜色定标后的色差值为2.6) (左图为颜色定标前图像, 右图为颜色定标后图像)

Figure 9 Contrast between image effects of photographing of the moderate-resolution camera imaging the landing zone (The chromatic aberrations before and after color calibration are respectively 31.5 and 2.6. The left is the image before the color calibration and the right is the image after color calibration).

致谢 感谢国家航天局探月与航天工程中心、中国科学院月球与深空探测总体部在相机研制工作中的大力支持, 感谢中国科学院月球与深空探测地面应用系统在地面试验验证和数据预处理方面的大力支持和帮助, 感谢航天科技集团第五研究院、第八研究院和中国科学院空间中心等总体单位在相机研制和联试试验中的大力支持和帮助, 同时也感谢中国科学院西安光学精密研究所和西安电子科技大学的参研人员。

参考文献

- 1 Ye P J, Sun Z Z, Rao W, et al. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China. *Sci China Technol Sci*, 2017, 60: 649–657
- 2 Ouyang Z Y, Zou Y M. Introduction to Mars Science (in Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2015 [欧阳自远, 邹永廖. 火星科学概论. 上海: 上海科技教育出版社, 2015]
- 3 Geng Y, Zhou J S, Li S, et al. Review of first Mars exploration mission in China (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2018, 5: 399–405 [耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务. 深空探测学报, 2018, 5: 399–405]
- 4 Li C L, Liu J J, Geng Y, et al. Scientific objectives and payload configuration of China's first Mars exploration mission (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2018, 5: 406–413 [李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置. 深空探测学报, 2018, 5: 406–413]
- 5 Zhu Y, Bai Y F, Wang L G, et al. Integral technical scheme of payloads system for Chinese Mars-1 exploration (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2017, 4: 510–514 [朱岩, 白云飞, 王连国, 等. 中国首次火星探测工程有效载荷总体设计. 深空探测学报, 2017, 4: 510–514]
- 6 Wu J, Zhu G W, Zhao H, et al. Overview of scientific objectives of China-Russia Joint Mars exploration program YH-1 (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2009, 29: 449–455 [吴季, 朱光武, 赵华, 等. 萤火一号火星探测计划的科学目标. 空间科学学报, 2009, 29: 449–455]
- 7 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]
- 8 Yu G B, Liu E H, Zhao R J, et al. Payload topography camera of Chang'e-3. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1881–1892
- 9 Zhang B M, Zhu Y, Wang L G, et al. Calibration of Mars rover's payloads for China's first Mars exploration mission (in Chinese). *J Deep Space Exp*, 2020, 7: 481–488 [张宝明, 朱岩, 王连国, 等. 中国首次火星探测任务火星车有效载荷定标试验. 深空探测学报, 2020, 7: 481–488]
- 10 Ren X, Li C L, Liu J J, et al. A method and results of color calibration for the Chang'e-3 terrain camera and panoramic camera. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 1557–1566
- 11 Zhao R J, Liu E H, Wang J, et al. A method of color correction for CE-3 satellite camera topography image (in Chinese). *J Astron*, 2016, 37: 341–347 [赵汝进, 刘恩海, 王进, 等. 嫦娥三号卫星相机地形图像的彩色校正方法. 宇航学报, 2016, 37: 341–347]

Designing and validation of moderate-resolution camera of Tianwen-1

YU GuoBin^{1,2*}, LIU EnHai^{1,2}, LIU GuangLin^{1,2}, ZHOU Li^{1,2}, ZENG JunZhe^{1,2},
CHEN YuanPei^{1,2}, ZHOU XiangDong^{1,2}, ZHAO RuJin^{1,2} & ZHU ShunYi^{1,2}

¹ Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

China's first Mars exploration mission Tianwen-1 will achieve Mars orbiting, landing and roving conduct global and comprehensive surveys and perform detailed inspections and surveys of key areas on the surface of Mars. A moderate-resolution camera is installed on the orbiter to image the surface of Mars, draw its global remote sensing image map, and explore the topography, geomorphology, and geological structure of Mars. The moderate-resolution camera is light weight and has a compact integrated design, which mainly comprises optical, focal plane, camera-control, power and interface, camera-support, thermal-control and reference modules. Radiometric, color, and geometric calibrations have been conducted to ensure that the camera accurately acquires the detection data of the surface of Mars. This paper introduces the detection mission, system composition, working principle, ground calibration test and results of the moderate-resolution camera and provides a reference for scientific data processing and applications.

Mars exploration, moderate resolution camera, system composition, working principle, calibration test

PACS: 07.07.Df, 07.60.-j, 07.68.+m

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0297](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0297)