



# 天问二号中视场彩色相机设计与验证

刘光林<sup>1,2,3\*</sup>, 乔丽<sup>1,2,3</sup>, 周黎<sup>1,2,3</sup>, 廖志远<sup>1,2,3</sup>, 张立华<sup>4</sup>, 刘恩海<sup>1,2,3</sup>, 周向东<sup>1,2,3</sup>,  
赵汝进<sup>1,2,3</sup>, 余国彬<sup>1,2,3</sup>, 陈元培<sup>1,2,3</sup>, 王进<sup>1,2,3</sup>

1. 自适应光学全国重点实验室, 成都 610209
2. 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室, 成都 610209
3. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209
4. 探月与航天工程中心, 北京 100037

\*联系人, E-mail: [lguanglin@163.com](mailto:lguanglin@163.com)

收稿日期: 2025-01-08; 接受日期: 2025-03-03; 网络出版日期: 2025-05-19

**摘要** 中国小行星探测任务天问二号通过一次发射, 实现对近地小行星2016HO3的伴飞、取样返回等探测, 之后前往主带彗星311P开展绕飞探测. 中视场彩色相机是搭载在天问二号探测器上的主要科学载荷之一, 其科学探测任务是对小行星和主带彗星成像, 获取其尺寸、形状、形貌、自转参数等特性. 中视场彩色相机采用了轻小型一体化设计, 主要由光学镜头、探测器组件、主控与图像输出组件、电源组件、结构组件、热控组件和基准组件组成. 开展了辐射定标、颜色定标和几何定标, 保证相机能真实、正确获取小行星表面图像. 本文介绍了中视场彩色相机的探测任务、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** 小行星探测, 中视场彩色相机, 系统组成, 工作原理, 定标试验

**PACS:** 07.07.Df, 07.60.-j, 07.68.+m, 06.20.Fn

## 1 引言

深空探测是当今世界极具挑战性、创新性与带动性的航天活动之一<sup>[1]</sup>, 小天体(包括小行星和彗星)<sup>[2]</sup>探测是当前空间探测的一个重要方向. 开展小天体探测不仅可以帮助人类探索太阳系起源和认知行星演化规律, 还可以为预防和应对小天体撞击提供参考和依据. 鉴于小天体探测具备的重大科学价值和现实价值, 当前已有不少国家以及航天局发射了若干搭载不同有效载荷的航天器, 对多个小天体实施了较为全面的探

测<sup>[3,4]</sup>. 中国也启动了“天问二号”探测任务, 通过一次发射, 实现对近地小行星2016HO3的伴飞、取样返回等探测, 之后前往主带彗星311P开展绕飞探测<sup>[5]</sup>.

中视场彩色相机是天问二号探测器的主要科学载荷之一, 其主要探测任务是对目标小天体表面进行全球精细成像观测, 测定其基本物理参数(包括形状、大小、颜色、自转特性等)、建立坐标系框架, 开展目标小天体全球制图和表面附着区选择、主带彗星表面形貌特征演变观测等工作<sup>[5]</sup>.

为克服深空探测任务距离远、时间长、运载能力

**引用格式:** 刘光林, 乔丽, 周黎, 等. 天问二号中视场彩色相机设计与验证. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279503

Liu G, Qiao L, Zhou L, et al. Designing and validation of asteroid medium angle camera (AMAC) of Tianwen-2 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2025, 55: 279503, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0005](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0005)

和器上能源有限、飞行环境严酷、测控能力低等困难<sup>[6]</sup>, 适应小天体的目标特性, 中视场彩色相机具有以下特点: (1) 轻量化、小型化: 使用单片高分辨率面阵彩色CMOS图像传感器, 以画幅式凝视的方式成像, 降低系统复杂度, 采用集成化设计, 满足深空探测平台承载能力限制; (2) 高可靠、长寿命: 进行了空间防护、环境适应性和可靠性设计, 具有在轨定标功能, 满足探测任务寿命10年的要求; (3) 集成化、多功能化: 总体设计从单一向多功能转变, 光、机、电集成化设计, 减轻深空探测器搭载重量和能源消耗的压力; (4) 自主工作: 更宽的探测覆盖能力, 适应探测对象特征的未知性和不确定性, 具备一定的星上自主工作能力, 尽量不依赖地面干预, 减小星地信息交互延迟的影响; (5) 暗弱目标成像: 通过探测器选择、光学系统设计、曝光参数选取等, 适应探测对象的低反照率特性<sup>[7]</sup>; (6) 高质量图像压缩: 在保证图像质量的前提下尽量提高压缩比, 适应深空探测的低传输带宽; (7) 科学探测的同时兼顾一定的工程应用, 实现性价比最优。

## 2 相机的科学探测目标、功能、性能

中视场彩色相机的主要科学探测任务是对目标小天体(主要包括2016HO3小行星和311P主带彗星)表面进行全球成像, 实现以下科学探测目标: (1) 确定目标小天体基本物理参数; (2) 目标小天体高精度全球制图; (3) 2016HO3小行星表面精细结构观测与地质演化研究; (4) 辅助2016HO3小行星采样附着区选择; (5) 主带彗星表面精细结构观测和活动性观测。

另外, 中视场彩色相机兼具部分工程应用能力: 相机具备自主目标位置提取和自主开窗功能, 利用相机视场相对较大的优势, 在对小行星目标进行远距离探测时, 快速捕获目标, 得到目标的指向信息, 引导其他科学载荷指向目标实施探测. 相机完成实时图像处理, 计算得到目标的行列号, 反馈到载荷管理单元. 载荷管理单元完成坐标系转换计算, 引导相应载荷指向小行星目标. 同时, 根据目标位置信息和注入的开窗大小参数, 中视场彩色相机可完成自主开窗处理, 输出包含小行星目标的窗口图像, 以减少图像数据量。

中视场彩色相机的功能为: (1) 获取小行星(暗弱目标)彩色影像, 具有静态拍照及动态摄像功能; (2) 具有自动/手动调节曝光能力; (3) 具有消减杂散光的措

施; (4) 太阳高度角大于 $10^\circ$ 时, 具有成像能力; (5) 具有在轨定标能力; (6) 具有通过开窗实现成像区域选择的功能; (7) 具有通过像元融合实现成像分辨率调整功能。

中视场彩色相机的主要性能指标见表1。

## 3 工作原理与系统设计

### 3.1 系统组成

中视场彩色相机充分继承天问一号中分辨率相机设计<sup>[8]</sup>, 沿用轻小型一体化结构形式, 保持系统组成和功能模块划分, 使用其成熟的环境适应性、可靠性等设计措施. 对相机电学性能进行了提升: 选用了更高分辨率的CMOS图像传感器和更高性能的主控FPGA, 增加了图像输出数据带宽, 提高帧频率; 为满足小天体探测需求, 对光学系统进行了重新设计, 减小了视场角, 增长了焦距; 同时对整机结构进行了优化设计, 减小了外形尺寸, 降低了重量。

中视场彩色相机主要由光学镜头、机体结构、基准镜、电源组件、探测器组件、主控与图像输出组

表 1 中视场彩色相机性能

Table 1 Performance of Asteroid Medium Angle Camera (AMAC)

序号	名称	性能指标
1	成像方式	框幅式彩色成像
2	波段范围	0.43–0.76 $\mu\text{m}$
3	视场角	$27.32^\circ \times 20.70^\circ$
4	有效像元数量	$5120 \times 3840$
5	像元分辨率	$\leq 0.285 \text{ m@轨道高度} 3 \text{ km}$
6	探测单元角分辨率	0.093 mrad
7	幅宽	$1.46 \text{ km} \times 1.09 \text{ km@轨道高度} 3 \text{ km}$
8	量化位数	12 bit
9	动态范围(dB)	63.9 dB
10	图像信噪比	52.0 dB
11	系统静态传函MTF	0.44
12	视场畸变	0.5%
13	杂散光系数	5.05%
14	动态摄像帧频	0.2和1 Hz
15	探测目标反照率适应能力	0.07–0.6
16	包络尺寸	$184 \text{ mm} \times 178 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$
17	质量	2.1 kg
18	功耗	最大20 W

件、热控单元等功能模块组成. 其中: (1) 光学镜头用于对小天体表面进行光学成像; (2) 机体结构用于安装光学镜头和各电路组件, 保证相机的力学性能, 并对相机电路进行电磁和空间辐射防护; (3) 基准镜用于测量相机在探测器上安装后的指向精度; (4) 电源组件将输入的一次电压转换为相机内部所需的各种电压, 并进行过流保护和滤波; (5) 探测器组件利用CMOS图像传感器将光学镜头获取的光学图像转换为电信号, 输出数字图像; (6) 主控与图像输出组件负责给CMOS图像传感器提供低噪声电压, 对其进行时序控制和参数配置; 接收和缓存CMOS图像传感器输出的图像数据流; 对图像进行灰度计算, 按策略进行自动或手动曝光; 将缓存的图像按规定格式进行输出; 接收并执行载荷管理单元发送的控制指令, 反馈工参和遥测信息; 对镜头进行温度控制; (7) 热控单元: 对相机镜头进行加热, 保证存储温度和最佳成像温度.

中视场彩色相机外形及组成图如图1所示.

### 3.2 工作原理

中视场彩色相机采用了小畸变画幅式成像方案, 使用高分辨率大面阵彩色CMOS图像传感器获取图像. 相机光学镜头对小天体成像, 光线汇聚到CMOS图像传感器感光面, 进行光电转换后获得原始数字图像数据. 原始数字图像分辨率为 $5120 \times 3840$ , 像素量化位数为12 bit, 单幅全分辨率图像原始数据量为225 Mbit. CMOS图像传感器以16路LVDS通道并行向主控与图像输出单元发送原始图像数据, 最大帧频率为4 fps. 主控与图像输出FPGA收到CMOS原始图像数据后写入同步动态随机存储器(SDRAM)中进行缓存,

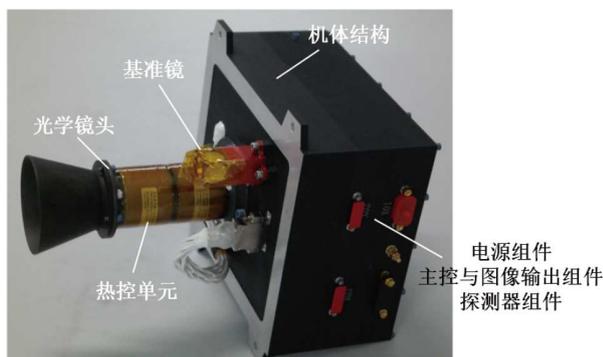


图1 中视场彩色相机外观图

Figure 1 Photograph of Asteroid Medium Angle Camera (AMAC).

然后根据设置的图像输出模式进行全幅、开窗或像元融合处理并以规定的格式进行分包, 并将该幅图像的曝光触发时刻、曝光时长、图像平均灰度以及此时的相机工作参数(工作模式、曝光模式、图像输出模式)等信息打包到图像数据包中, 通过四线制LVDS接口发送给载荷管理单元, 传输速率为100 Mbps. 在接收CMOS图像传感器原始图像的同时, FPGA的自动曝光功能模块以4 fps (短曝光模式)或1 fps (长曝光模式)的频率进行自动曝光计算, 支持三种自动曝光模式: (1) 全视场灰度模式; (2) 目标灰度模式; (3)带波门的目标灰度模式. 模式1使用全图平均灰度值进行曝光控制, 适用于距离目标较近, 目标充满整个视场的场景; 模式2从图像中自动提取目标, 剔除暗背景后进行灰度计算, 适用于暗背景加目标的场景; 模式3在模式2的基础上, 自动选取最大的主目标进行灰度计算, 剔除干扰目标的影响.

载荷管理单元通过遥控指令控制中视场彩色相机开、关机, 通过一路全双工RS422串口与相机通信, 向相机发送控制指令和注入配置参数, 采集相机反馈的工作状态、温度监测值、电流监测值等工程参数. 为节约和有效利用星上资源, 相机获取的探测图像由载荷管理单元统一进行压缩处理和存储, 择机进行回传, 压缩比可设置为不压缩、2:1、4:1和8:1压缩.

### 3.3 系统设计

#### 3.3.1 探测器选择

为了解决传统CCD图像传感器带来的功耗、重量和体积问题, 选择了近年来被广泛采用的CMOS图像传感器. 根据探测任务对相机功能、性能提出的要求, 结合小天体光照条件、温度环境和空间辐照水平进行分析, 中视场彩色相机选用了ASM公司的高分辨率彩色CMOS图像传感器. 该传感器采用8T晶体管专利像素结构, 像素数为2000万, 片上集成了暗电平箝位、相关双采样等降噪电路, 能够在弱光环境下获取高质量图像<sup>[9]</sup>. 其主要性能参数如下: (1) 快门模式: 全局快门, (2) 彩色模式: RGB Bayer, (3) 光谱响应范围:  $0.35\text{--}0.95 \mu\text{m}$ , (4) 有效像元数:  $5120 \times 3840$ , (5) 像元尺寸:  $6.4 \mu\text{m} \times 6.4 \mu\text{m}$ , (6) 灵敏度:  $8.3 \text{ V lux}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (带微透镜@550 nm), (7) 输出模数转换(ADC)位数: 12 bit, (8) 满阱容量:  $15 \text{ Ke}^-$ , (9) 暗噪声:  $8\text{e}^- \text{ RMS}$ , (10) 动态范围: 66 dB, (11) 量子效率:  $40\% @ 550 \text{ nm}$ ,

(12) 工作温度:  $-30^{\circ}\text{C}$ – $70^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.2 光学系统设计

中视场彩色相机光学设计必须适应深空探测的空间辐射环境、极冷极热温度环境和小天体低反照率的光照环境. 相机光学系统运用了辐照环境适应性设计分析技术, 所采用的光学玻璃和光学胶均为具备抗辐照能力的材料, 确保寿命期内空间辐照不会对镜头透过率造成明显影响. 同时, 相机安装位置温度变化较大, 光学镜头需耐受 $-50^{\circ}\text{C}$ 到 $+70^{\circ}\text{C}$ 的温度冲击, 并在 $-20^{\circ}\text{C}$ – $+40^{\circ}\text{C}$ 的真空热环境下具有良好的成像性能. 对相机采取了针对性的光学设计措施: 采用准像方远心透射式结构形式, 使像面照度均匀, 提高光能的利用率; 对光学镜头采取了无热设计措施, 镜筒选用钛合金材料, 并对镜头进行温控, 确保镜头在规定的温度范围内像质基本不变; 此外, 通过合理的镀膜设计确定了光学镜头截止波段范围, 确保输出图像在进行彩色校正后色彩真实.

中视场彩色相机光学系统的主要技术参数为: (1) 光谱范围:  $0.43\text{--}0.76\ \mu\text{m}$ , (2) 视场:  $27.31^{\circ} \times 20.66^{\circ}$  ( $\Phi 33.8^{\circ}$ ), (3) 入瞳直径:  $13.48\ \text{mm}$ , (4) 焦距:  $67.4\ \text{mm}$ , (5) 相对孔径:  $F/5$ , (6) 传递函数:  $\text{MTF} \geq 0.4@78\ \text{lp}\ \text{mm}^{-1}$ , (7) 畸变:  $\leq 0.3\%$ , (8) 光谱透过率:  $>80\%$ , (9) 工作温度:  $-20^{\circ}\text{C}$ – $+60^{\circ}\text{C}$ .

相机光学系统由10片透镜组成, 各透镜在设计波段内的平均透过率 $>98\%$ , 可保证镜头的透过率大于 $0.98^{10}=81.7\%$ .

在不同温度条件下, 对光学镜头MTF进行了分析. 真空状态下, 在 $-20^{\circ}\text{C}$ – $+60^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内, 考虑装

配公差后, 均能满足全视场优于 $0.4@78\ \text{lp}\ \text{mm}^{-1}$ 的要求.

在不同温度条件下, 分析了镜头存在轴向温度梯度和径向温度梯度时对MTF的影响. 真空状态下, 光学系统的环境工作温度为 $-20^{\circ}\text{C}$ – $+60^{\circ}\text{C}$ , 考虑装配公差后, 轴向温度梯度不超过 $2^{\circ}\text{C}$ , 径向温度梯度不超过 $0.5^{\circ}\text{C}$ 时, 均能满足全视场优于 $0.4@78\ \text{lp}\ \text{mm}^{-1}$ 的要求.

中视场彩色相机光学系统布局图、光学MTF (传递函数)曲线和光学系统畸变曲线分别如图2、图3和图4所示.

### 3.3.3 相机结构设计

中视场彩色相机结构采取了模块化设计措施, 相机结构分为镜头组件、主箱体组件、焦面组件、电控组件和热控组件. 镜头组件由遮光罩、光学镜片及镜头机械支撑结构组成; 焦面组件由传感器板和焦面机械支撑结构组成; 电控组件包含主控与图像输出板、电源板; 热控组件包含导热片、导热条、隔热垫、加热片和热包覆等. 各组件通过机械连接方式进行装配, 形成完整的相机结构. 结构设计时, 考虑了光学元件与结构零件间材料的匹配问题, 光学镜头结构材料使用钛合金, 箱体材料选用铝合金. 为减轻相机重量, 对结构进行了必要的轻量化设计. 由于光学镜头组件对温度的敏感性, 光学镜头与焦面组件和主箱体之间使用隔热垫进行隔热. 焦面组件设计了单独的散热通道, 具体做法是在CMOS图像传感器底部和印制电路板(PCB)之间安装铜导热片, 并在PCB正反面铺设大面积散热铜皮, 正反面的散热铜皮通过大量的通孔阵列导通传热, 最后在PCB背面散热铜皮上安装铜导热条并与相机结构紧密连接, 最终将器件产生的热传导至相

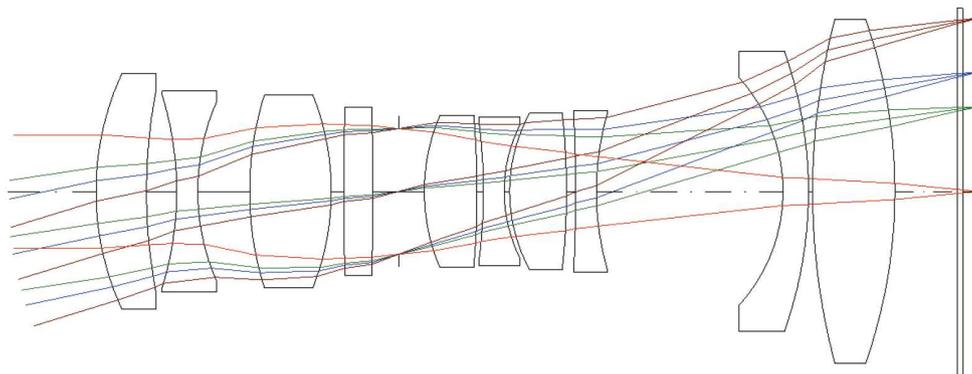


图 2 光学系统布局图

Figure 2 Layout diagram of the optical system.

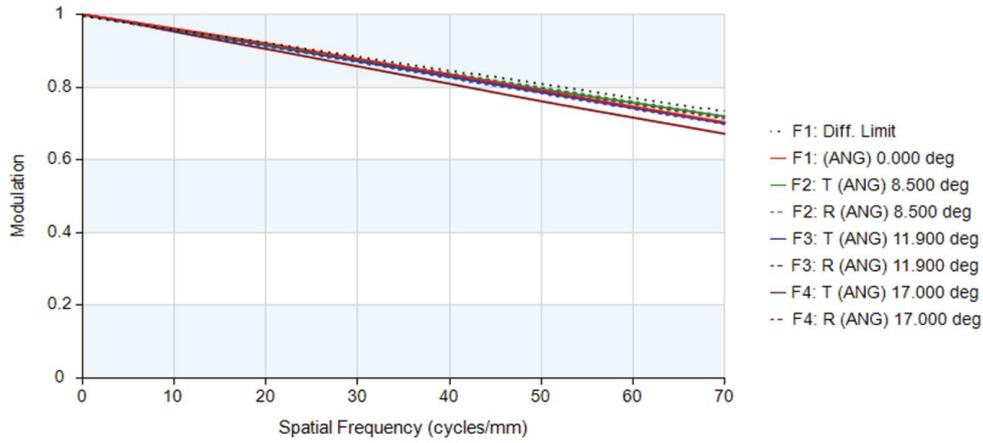


图 3 光学MTF (传递函数)曲线  
Figure 3 Optical modulation transfer function curve.

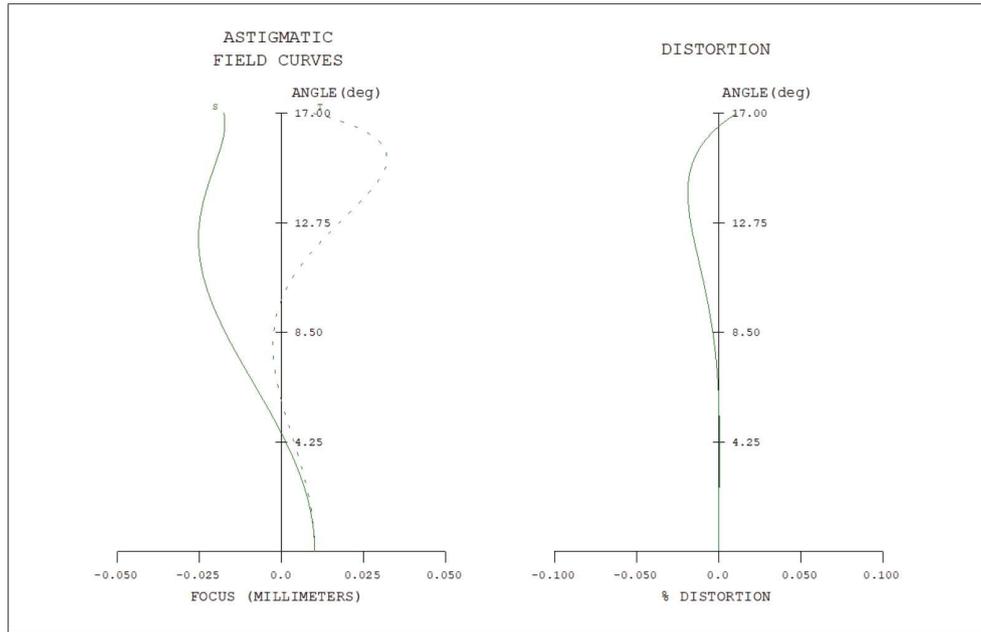


图 4 光学系统畸变曲线  
Figure 4 Distortion curve of the optical system.

机机械结构, 实现了高温工况下CMOS外壳到相机安装面间的温差不超过7℃, 使相机在高温环境中仍能正常工作。

通过模块化结构设计, 结合精细化装配工艺, 中视场相机实现了: 光学系统光轴与CMOS图像传感器之间的垂直度误差 $\leq 0.01$  mm; 光轴与基准镜之间的误差 $\leq 1'$ ; 图像传感器靶面与相机安装面之间的平行度(垂直度)误差 $\leq 2$ 像素。

中视场彩色相机结构设计示意图如图5所示。

## 4 地面定标结果

### 4.1 辐射定标结果

辐射定标包括相对辐射定标和绝对辐射定标两类。相对辐射定标的目的是消除相机由于受光学透镜和镀膜材料及工艺、图像传感器光电响应不均匀性等影响

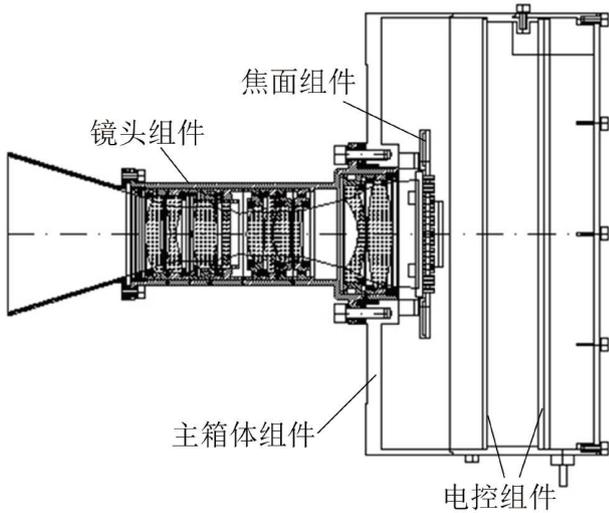


图 5 相机结构设计示意图  
Figure 5 Schematic diagram of camera structure design.

造成的像元间响应的不均匀性; 绝对辐射定标的目的是确定相机输出灰度值与实际辐亮度之间的函数关系. 中视场彩色相机采用基于标准探测器的定标方法<sup>[10]</sup>, 在试验实验室中利用积分球和标准辐射计进行定标.

中视场彩色相机采用进行相对辐射定标时, 用11种曝光时间(0.38, 1, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600 ms)分别采集了9种温度(-20℃, -10℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃, 50℃, 60℃)下的中视场彩色相机图像进行暗电流定标; 用18种曝光时间(0.38, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 120, 150 ms)分别采集了均匀光照环境下的中视场彩色相机的输出图像, 经过相对辐射定标后中视场彩色相机4个通道的图像光响应非均匀性(PRNU)最大值为2.5%.

在进行绝对辐射定标试验时, 在7种均匀光照(1.93, 4.64, 9.95, 25.68, 38.8, 46.66, 57.69 W m<sup>-2</sup> Sr<sup>-1</sup>)环境下采集了不同曝光时间的中视场彩色相机图像(图像的R, G1, G2, B通道均不发生饱和), 并进行了绝对辐射定标. 中视场彩色相机经绝对辐射定标后4个通道的绝对辐射定标误差最大值ACE为5.06%.

#### 4.2 颜色定标结果

由于相机的彩色光谱响应函数与CIE标准观察者匹配函数不一致, 且在深空环境下的光照条件与地面的模拟光照条件并不完全一致, 导致中视场输出目标图像颜色与目标的真实颜色之间存在一定色差. 为了

让相机的输出图像具有与真实目标颜色更接近的颜色效果, 需要对相机获取的彩色图像进行彩色定标. 在D65标准光源环境下, 获取24色彩色色标的RGB颜色分量后, 利用最小二乘误差约束法<sup>[11,12]</sup>获取了相机的彩色校正矩阵COR<sub>sRGB</sub> (15行×3列):

$$COR_{sRGB} = \begin{bmatrix} 0.812 & 0.109 & -0.088 \\ -3.768 & 4.223 & 0.379 \\ -0.367 & -0.717 & 1.917 \\ 2.632 & -2.220 & -0.079 \\ -3.636 & 3.429 & 0.540 \\ -1.228 & 1.399 & 0.163 \\ 1.816 & -1.100 & -0.549 \\ -5.172 & 5.044 & 0.295 \\ 4.497 & -5.544 & 1.214 \\ 21.027 & -16.527 & -4.499 \\ 15.765 & -4.405 & -11.360 \\ -4.046 & 4.406 & -0.359 \\ -25.073 & 27.735 & -2.663 \\ -5.052 & -2.068 & 7.120 \\ 38.193 & -36.239 & -1.954 \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过COR<sub>sRGB</sub>可将图像色彩校正至标准色彩值:

$$C'_m = C_m \times COR_{sRGB} \quad (2)$$

其中,  $C_m = [r_m \ g_m \ b_m \ rg_m \ rb_m \ bg_m \ rr_m \ gg_m \ bb_m \ rgg_m \ rbb_m \ grr_m \ gbb_m \ brr_m \ bgg_m]$ , 对应图像待校正色品值(1行×15列);  $C'_m = [r'_m \ g'_m \ b'_m]$ , 对应校正后图像色品值.

在D65环境下, 彩色校正后的图像中色标板的各色块颜色均得到了正确还原, 极大地减小了相机输出色块颜色与色块真实颜色之间的不一致性.

定标前后中性色标和24色彩色色标颜色的图像效果对比如图6所示.

#### 4.3 几何定标结果

相机的几何定标包括: 相机的焦距、主点以及畸变参数定标. 中视场彩色相机采用基于实验场的定标方法<sup>[10]</sup>, 在室外专用检校场拍摄网格图像进行几何定标. 在检校场中, 中视场彩色相机使用两个以上不同的姿态对靶标进行成像. 利用输出图像中靶标的标识点坐标与靶标在世界坐标系中的真实坐标点之间的约束关系, 即可解算出中视场彩色相机的主点、焦距以及畸变系数(表2). 利用几何定标得到的各项定标系数对中视场彩色相机进行畸变校正, 校正后X方向与Y方向的残差依次为0.12043, 0.12811像素.

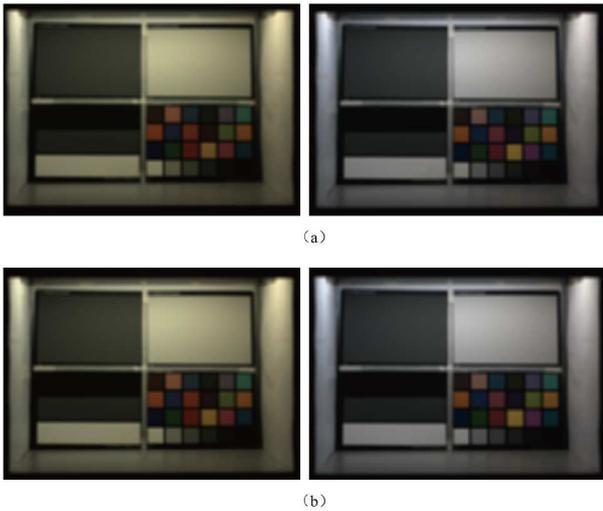


图 6 在D65光源下图像彩色校正前后的效果图. (a) 曝光时间为20 ms, 颜色定标前色差值为13.49, 颜色定标后色差值为2.73; (b) 曝光时间为40 ms, 颜色定标前色差值为13.50, 颜色定标后色差值为2.06

Figure 6 Effect diagrams of the image before and after color correction under the D65 light source. (a) The exposure time is 20 ms. The color difference value before color calibration is 13.49, and the color difference value after color calibration is 2.73. (b) The exposure time is 40 ms. The color difference value before color calibration is 13.50, and the color difference value after color calibration is 2.06.

表 2 几何定标结果

Table 2 Results of geometric calibration

序号	项目	参数
1	主点 $x_0$ /幅宽(pixel size)	2541.1421/5120
2	主点 $y_0$ /幅高(pixel size)	1895.3264/3840
3	焦距 $f$ (pixel size/ $\mu\text{m}$ )	10521.3018/67400
4	像素大小 ( $\mu\text{m}$ )	6.4061
5	径向畸变系数 $k_1$	$4.196554130 \times 10^{-11}$
6	径向畸变系数 $k_2$	$-8.730027995 \times 10^{-18}$
7	偏心畸变系数 $p_1$	$-5.191341914 \times 10^{-9}$
8	偏心畸变系数 $p_2$	$-6.081217227 \times 10^{-9}$
9	非正方形比例系数 $\alpha$	$-1.521661133 \times 10^{-5}$
10	非正交性畸变系数 $\beta$	$9.308002428 \times 10^{-5}$

几何定标的检校模型及量测点坐标规定如图7所示.

$$dx = x(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1(r^2 + 2x^2) + 2p_2 xy + \alpha x + \beta y, \quad (3)$$

$$dy = y(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_2(r^2 + 2y^2) + 2p_1 xy + \alpha x + \beta y, \quad (4)$$

其中,  $x, y$ 代表坐标系中的像素坐标值;  $r$ 代表当前像素与主点坐标的欧几里得距离.

## 5 地面验证结果

为保证中视场彩色相机在轨时功能正常, 能够适应探测目标的特定成像环境, 对相机进行了专项成像功能验证测试, 主要验证项目包括: 对暗弱目标(反照率0.1–0.2, 甚至更低)的成像能力; 评估图像信噪比、MTF等技术指标; 自动曝光、目标位置提取、开窗、像元融合等功能的实现情况. 验证结果为相机弱光成像能力和输出图像的技术指标满足要求, 所需功能均已实现并工作正常, 可以满足天问二号探测任务的需求(图8).

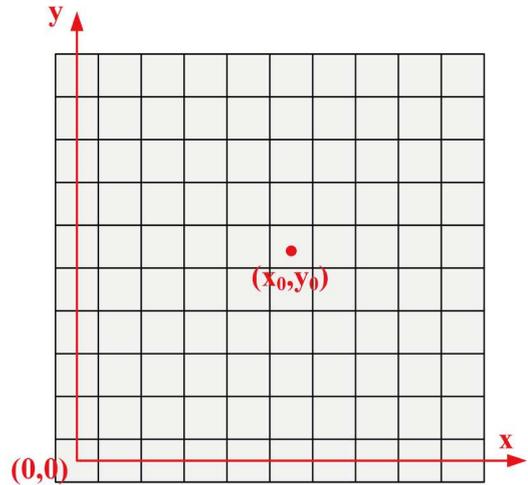


图 7 几何定标的坐标定义

Figure 7 The coordinate definition of geometric calibration.

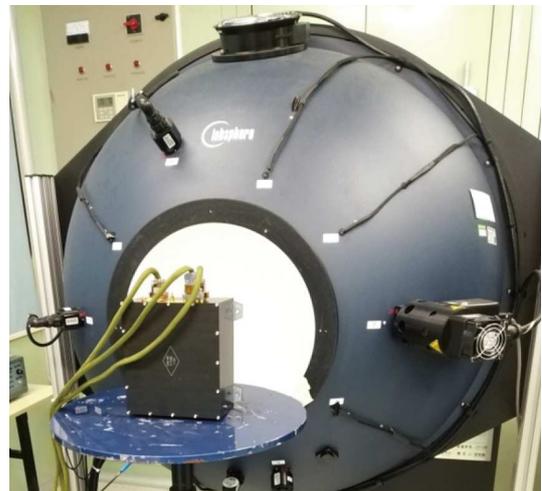


图 8 成像能力验证试验装置图

Figure 8 Imaging capacity verification test apparatus diagram.

## 6 结论

中视场彩色相机是天问二号探测器的主要有效载荷之一, 实现对目标小天体表面进行全球精细成像观测, 测定其基本物理参数(包括形状、大小、颜色、自转特性等)、建立坐标系框架, 开展目标小天体全球制图和表面附着区选择、主带彗星表面形貌特征演变观测等工

作。相机采用轻小型一体式结构, 进行了合理的空间辐射环境适应性和抗力学、热学环境设计, 可以满足小天体探测任务的特殊需求。为了保证中视场彩色相机能可靠完成探测任务, 对相机进行了全面的地面测试和环境试验; 为了保证探测图像数据的真实性和正确性, 对相机进行了专项定标试验, 获取了相机彩色校正矩阵及几何定标相关参数, 可用于后续对在轨科学数据的处理。

**致谢** 感谢国家航天局探月与航天工程中心的领导和同事在相机研制工作的大力支持。感谢中国科学院月球与深空探测总体部的领导和同事在相机研制工作的大力支持, 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, 感谢航天科技集团五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。

## 参考文献

- Zhang Z, Wu D, Baoyin H X. Progress and prospects of deep space exploration missions (in Chinese). *Aerosp Shanghai (Chinese & English)*, 2024, 5: 52–68 [张众, 武迪, 宝音贺西. 深空探测任务进展与展望. *上海航天(中英文)*, 2024, 5: 52–68]
- Yu H M, Zhang H, Huang X F, et al. Proposal for small celestial body exploration mission in China (in Chinese). *Space Int*, 2021, 9: 4–9 [余后满, 张焯, 黄晓峰, 等. 我国小天体探测任务设想. *国际太空*, 2021, 9: 4–9]
- Wang S, Gu Z X. Development of small body exploration (in Chinese). *Space Int*, 2017, 7: 10–16 [王帅, 谷知行. 小天体探测发展态势. *国际太空*, 2017, 7: 10–16]
- Li C L, Liu J J, Yan W, et al. Overview of scientific objectives for minor planets exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2019, 6: 424–436 [李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望. *深空探测学报*, 2019, 6: 424–436]
- Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2024, 11: 304–310 [李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置. *深空探测学报*, 2024, 11: 304–310]
- Ye P J, Meng L Z, Ma J N, et al. Suggestions on artificial intelligence technology application and development in deep space exploration (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2019, 6: 303–316 [叶培建, 孟林智, 马继楠, 等. 深空探测人工智能技术应用及发展建议. *深空探测学报*, 2019, 6: 303–316]
- Zhang H, Li F, Meng L, et al. Characteristics and close-range exploration methods of near-Earth asteroid 2016HO<sub>3</sub>. *Astron Techn Instrum*, 2024, 1: 42–51
- 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 [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]
- Xu J T, Wang X Y, Wang T D, et al. Review on optical visual sensor technology (in Chinese). *J Image Graph*, 2023, 6: 1630–1661 [徐江涛, 王欣洋, 王廷栋, 等. 光学视觉传感器技术研究进展. *中国图象图形学报*, 2023, 6: 1630–1661]
- Zheng F J. Research on Radiometric and Geometric Laboratory Calibration Methods of Aerial Remote Sensing Camera (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011. 16–22 [郑逢杰. 航空遥感相机辐射与几何实验室定标方法的研究. 硕士学位论文. 焦作: 河南理工大学, 2011. 16–22]
- 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
- 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 Astronaut*, 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 asteroid medium angle camera (AMAC) of Tianwen-2

LIU Guanglin<sup>1,2,3\*</sup>, QIAO Li<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Li<sup>1,2,3</sup>, LIAO Zhiyuan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lihua<sup>4</sup>,  
LIU Enhai<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Xiangdong<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Rujin<sup>1,2,3</sup>, YU Guobin<sup>1,2,3</sup>,  
CHEN Yuanpei<sup>1,2,3</sup> & WANG Jin<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu 610209, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

<sup>3</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

<sup>4</sup> Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China

\*Corresponding author (email: [lguanglin@163.com](mailto:lguanglin@163.com))

Through a single launch, China's Tianwen-2 asteroid exploration mission will accomplish close-range exploration, sampling, and return of the near-Earth asteroid 2016HO3. Subsequently, the probe will proceed to the main-belt comet 311P to conduct fly-around detection. The asteroid medium angle camera (AMAC) is one of the main scientific payloads carried on the Tianwen-2 probe. Its scientific exploration mission is to image asteroids and main-belt comets and obtain their characteristics such as size, shape, morphology, and rotation parameters. The AMAC adopts a lightweight and integrated design, mainly consisting of the optical, focal plane, camera-control, power, camera-support, thermal-control and reference modules. Radiometric, color, and geometric calibrations have been carried out to ensure that the camera can accurately and correctly acquire images of the asteroid surface. This paper introduces the detection mission, system composition, working principle, ground calibration tests and results of the AMAC, providing a reference for scientific data processing and applications.

**asteroid exploration, asteroid medium angle camera (AMAC), system composition, working principle, calibration test**

**PACS:** 07.07.Df, 07.60.-j, 07.68.+m, 06.20.Fn

**doi:** [10.1360/SSPMA-2025-0005](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0005)