

引用格式: Zhang Wen, , Li Haoming, et al. Design and Validation of a Multi-Color LED Illumination-Based Multispectral Microscopic Imaging System[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0711002

张文,李浩铭,成凯,等.多色LED照明式多光谱显微成像系统设计与验证[J].光子学报,2026,55(7):0711002

多色LED照明式多光谱显微成像系统设计与验证

张文^{1,2},李浩铭^{1,2},成凯¹,赵意意¹,陈小波¹,金一丹^{1,2},薛彬¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,月球与深空探测技术研究室,西安 710119)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:针对深空探测中多光谱显微成像设备对主动照明与小型化的需求,本研究设计并实现了一种环形多色LED主动照明光源,并在此基础上构建了一套多光谱显微成像系统。所设计光源采用与成像光轴同心的双环倾角阵列结构,抑制了样品微观形貌引起的方向性阴影,从结构层面提升了照明稳定性与视场一致性,整体半径仅 35 mm。光源集成了 14 个波段的 LED,覆盖 400 - 1600 nm,并基于单颗 LED 辐照度与器件尺寸约束提出弱波段增配策略,实现多波段照明能力的均衡。在验证方面,对系统进行了光谱分辨率和空间分辨率测试,测试结果表明系统能够满足探测需求;对目标矿物进行了 14 波段图像的采集,形成数据立方体,在此基础上进行了矿物反射率重建,重建曲线与光谱仪测量结果在谱形趋势上高度一致。结果表明,该环形多色LED照明方案具备结构紧凑、无运动部件、光谱通道数多等优势,可为后续深空行星表面多光谱显微成像载荷的光源设计与系统集成提供参考。

关键词:深空探测;多光谱成像;显微成像;LED照明;环形光源

中图分类号:V445.8

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265507.0711002

本研究的核心创新在于设计并实现了一种通道数更多、体积更紧凑的环形多色LED主动照明光源,并在此基础上构建了多光谱显微成像系统。本系统将光谱通道扩展至 14 个波段,覆盖 400 - 1600 nm,显著增强了对月表典型矿物光谱特征的获取能力;同时,通过光源选型与排布设计,有效满足了深空探测对载荷小型化与轻量化的要求。最终,该系统在无运动部件、无需复杂分光条件下,实现了对矿物样品的多光谱显微成像与光谱反射率重建,为深空微尺度矿物识别与成分分析提供了新的技术途径。

0 引言

深空行星探测的重要科学目标之一是通过原位探测识别与生命活动相关的潜在迹象,并在明确的地质背景约束下开展目标区域的地质与矿物组成表征,从而理解其成因过程与环境演化历史^[1]。近年来多项火星探测任务将古环境重建与潜在生命迹象识别作为核心科学目标,强调对目标区域成分与演化过程的综合探测^[2]。

在行星表面探测中,多光谱成像系统凭借其同步获取空间与光谱信息的能力,已成为深空探测载荷的重要类型。例如火星科学实验室(Mars Science Laboratory, MSL)“好奇号”搭载的桅杆相机(Mast Camera System, Mastcam)在 400-1100 nm 波长范围内配置了 12 种窄带滤光片实现多光谱成像,为分析岩石与土壤的铁氧化物特征、表面风化状态及颜色变化提供了关键数据支撑^[3-4]。然而,此类面向宏观场景观测的多光谱相机通常覆盖米级至厘米级尺度,其单个像元内往往包含多种矿物颗粒,导致获取的光谱呈现显著的混

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2025JC-YBMS_694),中科院青促会(2023424),国家自然科学基金委员会(12403098)

第一作者:张文(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为深空探测技术。Email: 2452860226@qq.com

导 师:薛彬(1979—),男,研究员,博士,主要研究方向为深空探测技术。Email: xuebin@opt.ac.cn

收稿日期:2026-02-04;**录用日期:**2026-03-30

<http://www.photon.ac.cn>

合特征^[5-7]。这种混合像元效应会造成矿物特征吸收带变浅、谱形畸变甚至相互掩盖,从而显著降低多光谱数据在矿物组成判别与丰度反演中的可靠性。为缓解宏观多光谱成像混合像元对矿物组分判别带来的不确定性,需要将观测尺度进一步细化至颗粒与微结构层级。在微尺度探测方面,多项深空任务已引入多光谱显微成像手段,通常通过多色LED分时照明获取离散波长图像,实现对颗粒结构与局部成分的联合观测。例如,MSL搭载的火星手持透镜成像仪(Mars Hand Lens Imager, MAHLI)可在近距离条件下获得微米级分辨率图像,并借助集成白光LED主动照明实现彩色成像^[8-9];“凤凰号”(Phoenix)火星车搭载的光学显微镜(Microscopy, Electrochemistry, and Conductivity Analyzer – Optical Microscope, MECA-OM)使用利用红、绿、蓝及紫外LED分时照明,获取了火星表面的彩色图像与荧光信息^[10];罗塞塔-菲莱(Rosetta-Philae)彗星探测任务中,罗塞塔着陆器成像系统(Rosetta Lander Imaging System, ROLIS)近距相机采用多色LED照明获得了彗星表面475 nm、540 nm、645 nm与875 nm四个波长的多光谱图像。在后续计划中,“月球顶点”(Lunar Vertex)任务计划搭载多光谱显微相机(Rover Multispectral Microscope, RMM),通过多色LED分时照明实现5个离散波长的多光谱成像^[11-12],进一步表明多光谱成像系统正向微尺度方向推进。尽管上述任务已初步证明多光谱显微成像在微尺度结构—成分判别中的价值,但现有多光谱显微成像载荷仍普遍存在光谱通道数有限且波长覆盖范围较窄的问题,不能覆盖可见—近红外范围内多种典型矿物的关键诊断性吸收特征,从而限制了对矿物微观组分的区分能力。因此,发展具有更多光谱通道、更宽谱段覆盖能力,并兼顾小型化与高可靠性的多光谱显微系统,已成为一个关键的技术发展方向。

针对上述需求与现有技术的不足,本研究设计并实现了一种环形多色LED主动照明光源,并在此基础上构建了一套多光谱显微成像系统。该系统利用多色LED实现多光谱成像,波长范围覆盖400–1600 nm,涵盖多种典型矿物的关键光谱特征区间。通过优化光源布局,系统在实现宽谱段覆盖的同时保持了小型化特点,环形光源半径仅为35 mm。本文围绕系统光学结构、照明方案与成像性能开展设计与实验验证,并通过典型矿物样品测试评估系统的光谱响应特性与成分判别能力,可为未来深空探测任务中微尺度矿物精细表征提供技术参考。

1 原理与设计

1.1 主动照明式多光谱成像原理

对于主动照明式的多光谱成像系统,假设 $S_i(\lambda)$ 为第 i 个单色光源的光强分布, (x, y) 为成像空间坐标, $R(\lambda, x, y)$ 为目标矿物的光谱反射率, $K(\lambda)$ 为成像模块的光谱响应度,则成像模块得到的目标光谱图像信息为:

$$DN_{s,i}(x, y) = S_i(\lambda) R(\lambda, x, y) K(\lambda) + DN_{s,0}(x, y) \quad (1)$$

式中 $DN_{s,0}(x, y)$ 为在未开启主动照明光源时,成像系统拍摄目标所获得的暗电流与外界杂散光之和。此时目标本身真实的光谱图像信息 $DN_{s,i}^*(x, y)$ 为:

$$DN_{s,i}^*(x, y) = DN_{s,i}(x, y) - DN_{s,0}(x, y) \quad (2)$$

在与拍摄目标矿物相同照明条件下,成像模块获取到标准反射率白板的光谱信息为 $DN_{w,i}(x, y)$,拍摄标准反射率白板对应的暗电流与外界杂散光叠加值为 $DN_{w,0}(x, y)$,那么目标在 (x, y) 像素点处的相对反射率 $\rho_{relative}(x, y)$ 为:

$$\rho_{relative}(x, y) = \frac{DN_{s,i}^*(x, y)}{DN_{w,i}^*(x, y)} = \frac{DN_{s,i}(x, y) - DN_{s,0}(x, y)}{DN_{w,i}(x, y) - DN_{w,0}(x, y)} \quad (3)$$

矿物在第 i 个波长下的绝对光谱反射率 $R_{s,i}(\lambda, x, y)$ 为:

$$R_{s,i}(\lambda, x, y) = \rho_{relative}(x, y) \times R_{w,i}(\lambda) \quad (4)$$

式中 $R_{w,i}(\lambda)$ 为白板在第 i 个波长下的反射率。

主动照明式的多光谱显微成像系统由成像模块及照明模块组成。系统旨在深空环境下获取目标矿物的微米级形貌信息与多光谱信息,为揭示目标矿物成分及结构提供数据支撑。系统总体设计遵循成像模块与照明模块相互独立、协同工作的原则。成像模块具有较宽的光谱响应,用来获取目标表面微结构信息与

光谱信息;照明模块由多种颜色LED共同组成,为获取矿物的光谱特征提供条件。

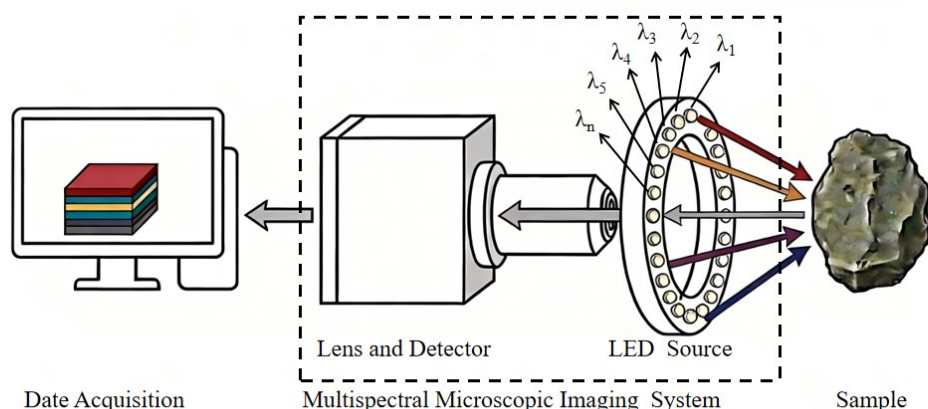


图1 主动照明式多光谱显微成像系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of active Illumination multispectral microscopic imaging system

1.2 多色LED照明模块设计

a) 多色LED波长选取

LED的发光波长及半高全宽(FWHM)主要由半导体材料的物理性质与量子结构决定^[13],其中材料成分决定发射峰值,而载流子的热分布与量子阱结构则共同影响光谱宽度。在实际工程应用中,通常只能在供应链所能提供的LED内进行选型。因此,多色LED的波长选取必须兼顾实际可获得性与具体的光学设计需求。

本研究设计的多光谱显微成像系统旨在获取天体表面关键矿物的形貌信息与光谱信息,所以多色LED光源的波长选取需要与矿物特征光谱紧密结合。以月球为例,月球表面岩石与月壤的反射光谱主要由少数几类造岩矿物及其风化产物共同控制:高地物质以斜长石(以富钙端元为主)占主导,月海玄武岩则以辉石(低钙辉石/高钙辉石)与橄榄石为主;同时,钛铁矿等不透明暗化剂会降低整体反射率并削弱硅酸盐矿物在1000 nm附近的吸收特征,并在可见光(约600 nm附近)引入更强的吸收趋势;此外,空间风化形成的凝聚体与纳米相金属铁会导致谱形“变暗、红化、吸收带变浅”,并进一步弱化斜长石在1250 nm附近的弱吸收带^[14]。

结合目标矿物的特征光谱范围,本研究选用了一款铟镓砷(InGaAs)近红外探测器,其光谱响应覆盖400 nm - 1700 nm,由此也对LED的波长范围形成约束。

本研究从Edmund Optics、Thorlab、Ocean Insight、Philips Lumileds等厂商的LED产品中选取14种LED,对应波长为430 nm,450 nm,490 nm,525 nm,645 nm,680 nm,890 nm,930 nm,970 nm,1085 nm,1200 nm,1300 nm,1450 nm,1600 nm,这些波长与矿物特征光谱曲线关系如图2所示。

b) 多色LED光源结构设计

多色LED光源的照明能力与成像有效性不仅取决于各波长的光功率输出,更受其排布方式与单波长LED在工作距离处形成的辐照度所约束。一方面,排布方式决定了光束在视场内的入射角度、阴影形成与抑制效果;另一方面,不同中心波长LED的辐照度受其光功率与发散角影响,直接决定了多光谱成像的信噪比以及曝光时间。因此,在多光谱显微成像的光源结构设计中,需要同时考虑LED排布方式和辐照度两方面。

目标表面微尺度起伏会在单侧或非对称照明条件下产生明显方向性阴影,影响纹理对比度并降低多波长图像序列的可比性。为降低方向性阴影与方位角照明起伏,采用环形对称排布:同一波长LED在环上以视场中心为对称点进行对称配置(两点对称或四点对称)。同时,为LED设置倾角使照明中心重叠并提高视场内有效照明利用率。倾斜对称式照明示意图如图3所示, α 为LED发散半角。由几何关系可得LED倾角满足

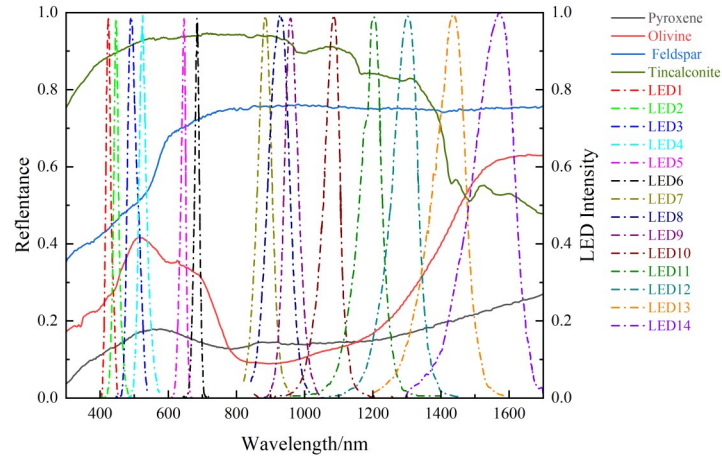


图2 月球常见矿物光谱与LED光源光谱

Fig.2 Spectral characteristics of common Lunar minerals and LED

$$\tan\theta = \frac{r}{d} \quad (5)$$

式中 r 为光源中心半径, d 为工作距,值为180 mm。

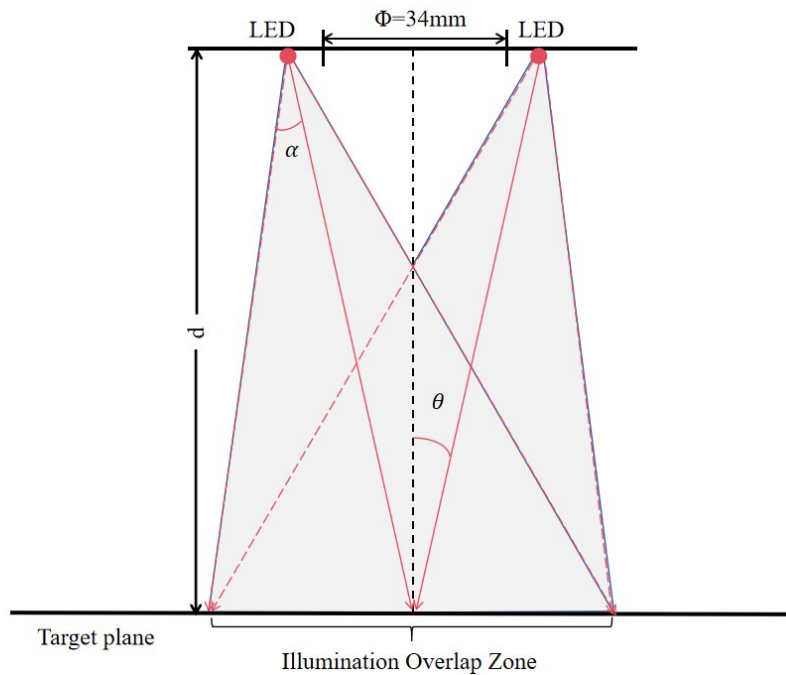


图3 带倾角的LED照明示意图

Fig.3 Schematic diagram of tilted LED illumination structure

选用14种波长的LED按照对称式排布至少需要布置28颗LED,受显微成像镜头外形尺寸约束(镜头半径约17 mm)以及LED封装尺寸限制(单颗LED等效半径约2.7 mm),环形光源的最小内径需满足机械避让与装配空间要求。综合考虑环形光源内壁结构厚度,环形光源的最小内圈半径确定为22 mm。由于在该条件下采用单圈排布难以容纳全部LED数量并满足预定排布方案,本文采用双圈式环形阵列结构:内圈半径取22 mm;为避免内外圈焊盘及走线间发生电气短路,同时为外圈LED预留必要的安装与布线间距并保证可容纳目标颗数,外圈半径设置为32 mm。

另一方面,不同波长LED受器件物理、封装与效率差异影响,其输出辐射能力存在显著差异,若各波长均采用相同颗数,易出现弱波长信噪比不足、曝光时间过长等问题,导致多波长序列动态范围不一致并增加

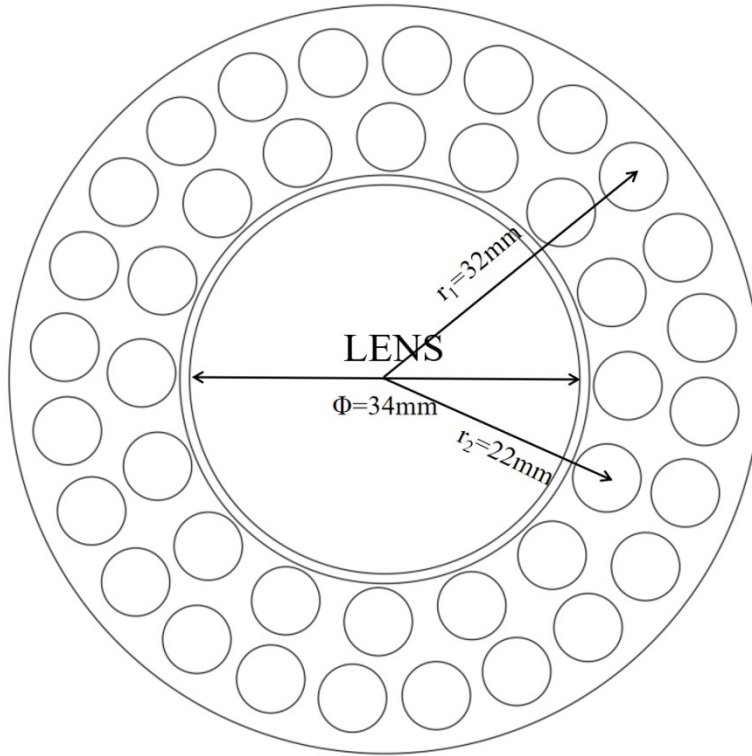


图4 环形LED排布示意图

Fig.4 Schematic Diagram of Circular LED Arrangement

反射率重建误差。为此,建立基于单颗LED倾斜照明后的辐照度估算模型,并提出“弱波长增配”的数量配置策略:在保持环形对称布置前提下,对单颗辐照度最低的波长增加LED颗数,以实现波长间照明能力的相对均衡并保证弱波长成像信噪比。

各通道LED的轴心辐照度 $E(\alpha)$ 为:

$$E(\alpha) = n \frac{I \cos^3 \alpha}{\pi d^2} \quad (6)$$

式中 I 为单颗LED的光功率, d 为工作距离,其值为180 mm, α 为LED的发散半角,其值为 20° , n 为LED的颗数。根据式(6),各通道下单颗LED辐照度如表1所示。结合计算结果与排布方式,对于490 nm、525 nm、1300 nm和1600 nm四个波长,分别选用4颗LED;其余波长则各选用2颗,使各通道辐照度相近,以保证信噪比。由表1可知,本研究所选多色LED共计36颗。

根据式(5)计算得出内圈LED倾角为 $\theta_1=6.97^\circ$,外圈LED倾角 $\theta_2=10.08^\circ$ 。最终设计的环形多色LED光源结构如图5所示,内圈排布16颗LED,外圈排布20颗LED。同时为满足器件安装需求,外圈预留4个螺纹孔位。为提高环境适应性与器件可靠性,光源外部设置透明玻璃罩用于防护。光源整体最大半径为35 mm,结构紧凑,可满足系统的小型化集成需求。

2 测试与验证

所设计的系统如图6所示,其中成像模块由400–1700 nm宽谱段探测器与C口覆盖可见至短波红外的宽谱段镜头组成。成像模块参数的选取主要基于空间分辨率、工作距离及光谱范围的综合匹配,针对微米的目标分辨能力需求,选用 $3.45 \mu\text{m}$ 像元尺寸的探测器;在180 mm工作距离约束下,选用45 mm焦距镜头以实现长工作距离成像,考虑系统工作波段为400–1600 nm,镜头采用宽谱设计,F数为2,以兼顾成像通光量与长波段信噪比。光源模块为本研究设计的环形多色LED光源,本章节将针对该系统进行性能测试与实验验证。

2.1 性能测试

对于多光谱显微成像系统,光谱分辨率与空间分辨率是衡量其性能的重要指标,本小节对系统的光谱

表 1 各通道 LED 配置颗数与辐照度
Table 1 Configuration of LEDs per channel in relation to irradiance.

Serial Number	Wavelength of LED (nm)	Optical power of single LED (W)	Number of LED	Irradiance of each channel (W/mm^2)
band1	430	0.008	2	1.305×10^{-7}
band2	450	0.007	2	1.142×10^{-7}
band3	490	0.003	4	9.786×10^{-8}
band4	525	0.004	4	1.305×10^{-7}
band5	645	0.009	2	1.468×10^{-7}
band6	680	0.008	2	1.305×10^{-7}
band7	890	0.007	2	1.142×10^{-7}
band8	930	0.009	2	1.468×10^{-7}
band9	970	0.006	2	9.786×10^{-8}
band10	1085	0.007	2	1.142×10^{-7}
band11	1200	0.007	2	1.142×10^{-7}
band12	1300	0.0035	4	1.142×10^{-7}
band13	1450	0.006	2	9.786×10^{-8}
band14	1600	0.004	4	1.305×10^{-7}

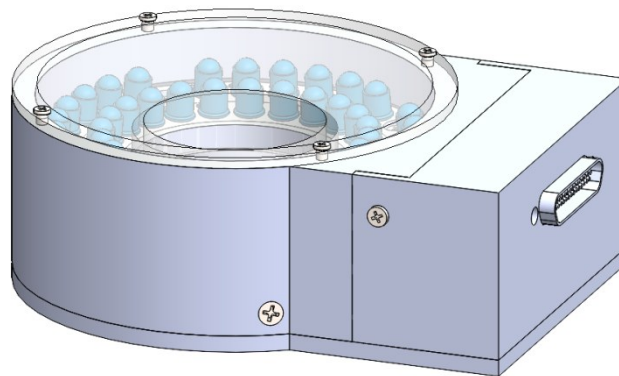


图 5 光源结构图

Fig.5 The structure diagram of light source

分辨率与空间分辨率进行测试。

a) 光谱分辨率

对于所设计的显微多光谱成像系统,其光谱分辨率由 LED 光源的发射光谱与成像模块的光谱响应度两者决定,所以需要对 LED 光源的发射光谱与相机的光谱灵敏度分别进行测试。

LED 光源发射光谱曲线测量使用的光谱辐亮度计为英国 Malvern Panalytical Ltd 公司的 ASD Field-Spec 3,光谱测量范围为 350~2500 nm,测试环境为暗室。测得的典型光谱曲线如图 7 所示。

成像模块光谱响应度采用单色仪法获得^[15],数据采集实验装置如图 8 所示。得到成像模块的归一化光谱响应度曲线如图 9 所示。

结合 LED 光源发射光谱与成像模块光谱响应度,最终得到该系统的光谱分辨率曲线如图 10 所示,实测中心波长与半高宽如表 2 所示。可见光范围内光谱分辨率可达 22 nm,近红外范围内光谱分辨率在 50 nm 左右,能够满足系统光谱分辨率要求,为后续对矿物的光谱曲线重建提供支持。

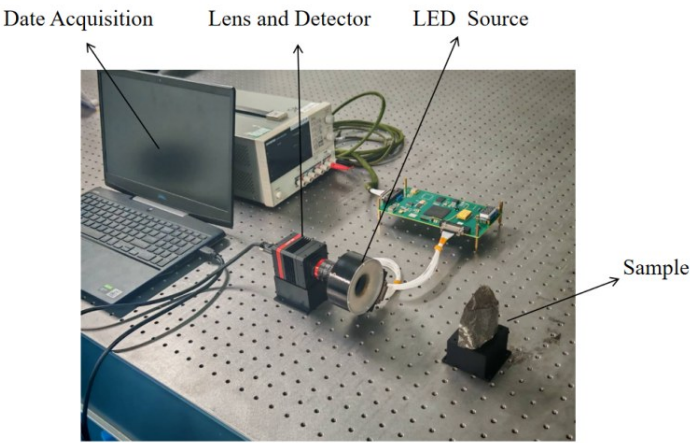


图 6 多光谱显微成像系统
Fig.6 Multispectral micro-imaging system

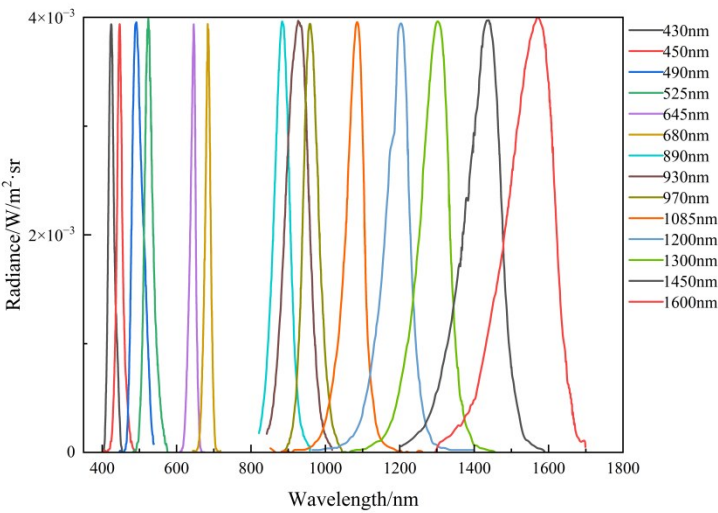


图 7 LED 光谱功率分布谱
Fig.7 Spectral power distribution of LEDs

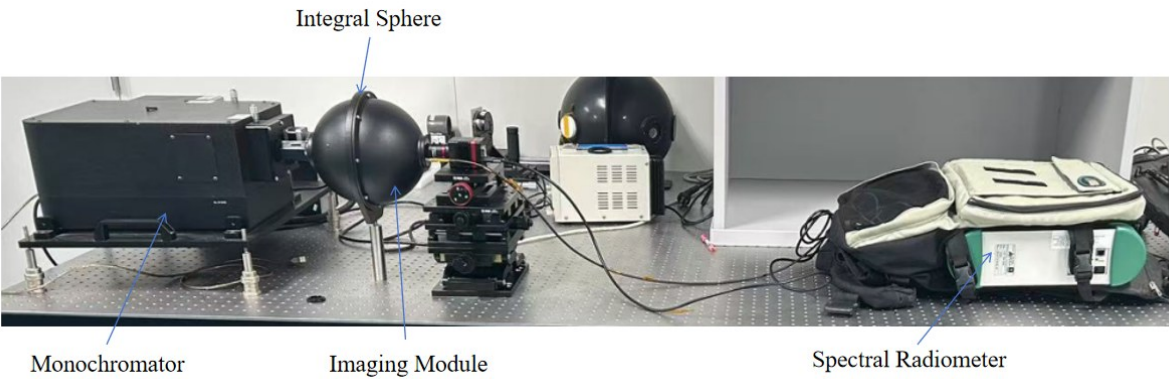


图 8 成像模块响应度测试设备
Fig.8 Responsivity test device for the imaging module

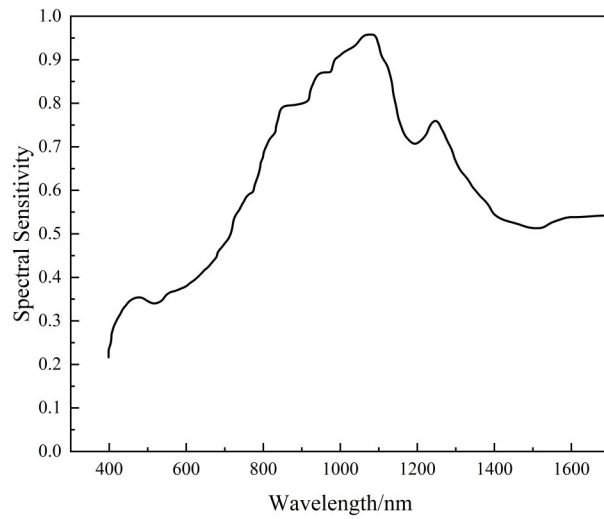


图9 成像模块光谱响应度
Fig.9 Spectral responsivity of the imaging module

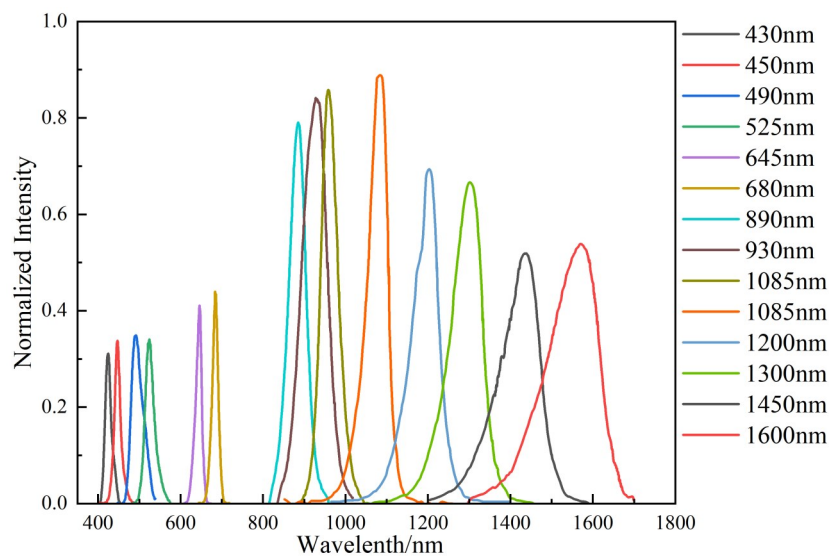


图10 光谱分辨率曲线
Fig. 10 Spectral resolution curve

b) 空间分辨率

为了评估系统的空间分辨率,采用USAF-1951光学分辨率板作为成像目标,在工作距离为180 mm的条件下进行分辨率测试。测试过程中,将标尺与分辨率板放置于成像系统视场中心位置,调整成像位置至最佳对焦状态,在1600 nm单色LED的照明条件下采集图像。拍摄到的标尺如图11所示,系统成像视场 $20\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 。

拍摄到的光学分辨率板如图12所示。由衍射极限可知,空间分辨率随波长增加而减小,因此该系统在1600 nm波长的空间分辨率即为全波长的最低分辨率,可表征该系统整体的空间分辨率,由图12可知,在1600 nm波长可分辨线对组为4-3,对应分辨线对数为20.16 lp/mm,最小可分辨线宽约为 $24.8\text{ }\mu\text{m}$,能够清晰地捕捉矿物表面形貌。

2.2 实验验证

本文以月表存在广泛的斜长石样品开展验证实验。首先,在LED未点亮状态下获取一幅图像,用以表

表 2 系统各通道中心波长与半高宽
Table 2 Center Wavelength and Full Width at Half Maximum of Each System Channel

Serial Number	Measured central wavelength(nm)	FWHM(nm)
band1	430.2	14.0
band2	450.3	10.2
band3	490.2	22.0
Band4	525.0	20.0
band5	645.5	20.2
band6	683.3	18.2
band7	887.2	40.0
band8	928.3	59.8
band9	968.5	32.2
band10	1085.0	60.0
band11	1200.1	56.0
band12	1301.8	66.2
band13	1442.7	56.0
band14	1572.8	97.8

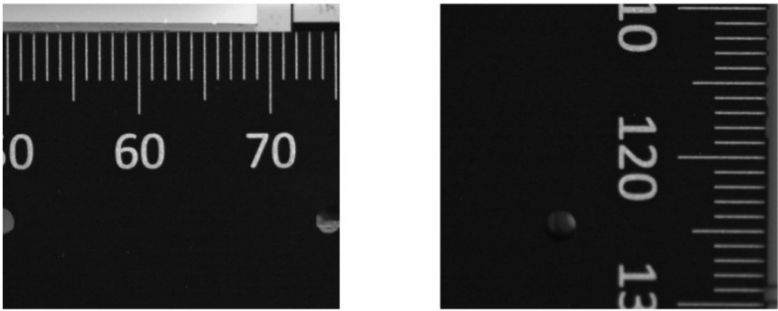


图 11 视场测试结果

Fig.11 Field of view test results

(a) 横向视场 25 mm (b) 纵向视场 20 mm
(a) Horizontal field of view:25 mm (b) Vertical field of view:20 mm

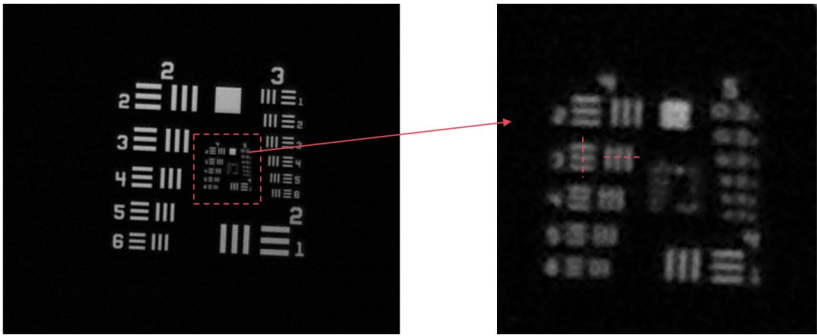


图 12 USAF-1951 光学分辨率测试板拍摄结果

Fig.12 Imaging results of the USAF-1951 optical resolution test chart

征暗电流与杂散光背景;随后按照波长顺序依次点亮 14 个 LED 波长,在相同成像条件下获得 14 幅单波长图像。由此共得到 15 幅图像,其中后 14 幅构成样品的多光谱数据立方体如图 13(a)所示;第一幅无照明图像作为暗电流与杂散光叠加项,在反射率重建过程中用于背景扣除。

在对采集图像进行暗电流、杂散光扣除,并进行白板归一化定标后,样品矿物反射率重建结果如图 13 (b)所示,其中曲线 4 为 ASD 光谱仪对 ROI 1 反射率测试结果,曲线 1、2、3 为分别对 ROI 1、ROI 2、ROI 3 进行反射率重建结果。为定量评估反射率重建精度,将 ROI 1 的重建反射率在 14 个 LED 波长处与 ASD 参考光谱在对应波长处的反射率进行比较。结果表明,ROI 1 重建曲线与 ASD 参考曲线具有较高一致性,相关系数 $r \approx 0.996$, RMSE 约 0.0076。上述结果说明系统结合暗电流/杂散光扣除与白板归一化定标后能够较准确地重建矿物反射光谱特征。ROI 2 及 ROI 3 曲线相对 ROI 1 存在整体偏移,主要由样品表面形貌与局部倾角差异引起的几何响应变化所致,但各曲线在谱形与变化趋势上保持一致,进一步验证了系统对矿物相对光谱特征的稳定获取能力,可为后续矿物识别与成分分析提供可靠的多光谱数据支撑。

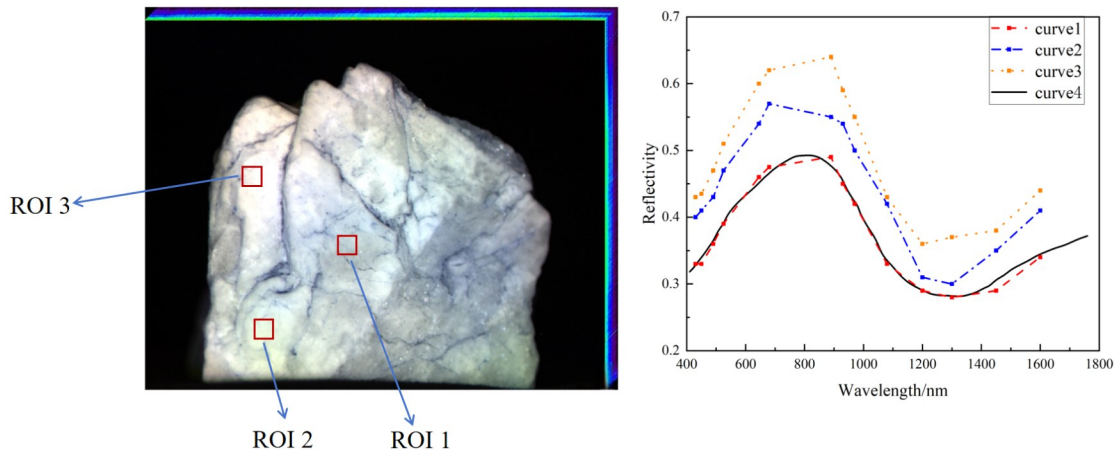


图 13 目标矿物光谱特征信息

Fig.13 Spectral characteristic information of the target mineral

(a) 目标矿物多光谱数据立方体 (b) 各区域反射率曲线

(a) Multispectral data cube of target minerals (b) Reflectance curve of ROI

3 总结

针对深空探测多光谱显微成像载荷主动照明与小型化需求,本研究设计并实现了一种环形多色 LED 主动照明光源,并在此基础上构建了一套多光谱显微成像系统。该光源将光谱通道扩展至 14 个波段,覆盖 400 - 1600 nm,半径仅 35 mm,满足紧凑化要求。测试验证表明,系统的光谱分辨率在可见光波段可达 22 nm,在近红外波段为 50 nm 左右,空间分辨率为 24.8 μm ,能够满足探测需求;对目标矿物进行了 14 波段图像的采集,形成数据立方体,并在此基础上进行了矿物反射率重建,重建曲线与光谱仪测量结果在谱形趋势上高度一致。结果表明,该环形多色 LED 照明方案具备结构紧凑、无运动部件、光谱通道数多等优势,可为后续深空行星表面多光谱显微成像载荷的光源设计与系统集成提供参考。

参考文献

- [1] Committee on Astrobiology Science Strategy for the Search for Life in the Universe, Space Studies Board, Division on Engineering and Physical Sciences, et al. An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe[M]. Washington, D.C.: National Academies Press, 2019: 25252.
- [2] BELL J F, MAKI J N, MEHALL G L, et al. The Mars 2020 Perseverance Rover Mast Camera Zoom (Mastcam-Z) Multispectral, Stereoscopic Imaging Investigation[J]. Space Science Reviews, 2021, 217(1): 24.
- [3] BELL J F, GODBER A, MCNAIR S, et al. The Mars Science Laboratory *Curiosity* rover Mastcam instruments: Pre-flight and in-flight calibration, validation, and data archiving[J]. Earth and Space Science, 2017, 4(7): 396-452.
- [4] RICE M S, JOHNSON J R, MILLION C C, et al. Spectral Variability of Rocks and Soils on the Jezero Crater Floor: A Summary of Multispectral Observations From *Perseverance's* Mastcam-Z Instrument[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2023, 128(10): e2022JE007548.
- [5] KESHAVA N, MUSTARD J F. Spectral unmixing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(1): 44-57.
- [6] POULET F, ERARD S. Nonlinear spectral mixing: Quantitative analysis of laboratory mineral mixtures[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2004, 109(E2): 2003JE002179.
- [7] SHI C, WANG L. Incorporating spatial information in spectral unmixing: A review[J]. Remote Sensing of Environment,

- 2014, 149: 70–87.
- [8] EDGETT K S, YINGST R A, RAVINE M A, et al. Curiosity's Mars Hand Lens Imager (MAHLI) Investigation[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 170(1–4): 259–317.
 - [9] MINITTI M E, KAH L C, YINGST R A, et al. MAHLI at the Rocknest sand shadow: Science and science-enabling activities[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(11): 2338–2360.
 - [10] KELLER H U, GOETZ W, HARTWIG H, et al. Phoenix Robotic Arm Camera[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, 113(E3): 2007JE003044.
 - [11] DIOTTE F, LEMELIN M, KLIMA R L, et al. Insights into Lunar Microscale Topography: Evaluating Photogrammetry Techniques Using the Lunar Vertex Rover Multispectral Microscope[C]//55th Lunar and Planetary Science Conference: Vol. 3040. 2024: 2322.
 - [12] BLEWETT D T, HALEKAS J, KOLLMANN P, 等. The Lunar Vertex PRISM Payload: Updates and Plans[C]//56th Lunar and Planetary Science Conference: 卷 3090. 2025: 1233.
 - [13] CHEN N C, LIEN W C, YANG Y K, et al. Spectral shape and broadening of emission from AlGaInP light-emitting diodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(7): 074514.
 - [14] HESS M, WILHELM T, WÖHLER C, et al. Uncertainty Introduced by Darkening Agents in the Lunar Regolith: An Unmixing Perspective[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4702.
 - [15] LIU Shuhan, WANG Li, SUN Xiuqing, LI Lin. *Radiometric calibration and spectral inversion of a multispectral star sensor*JJJ. *Aerospace Control*, 2024, 42(3): 61–67.
- 刘姝含;王立;孙秀清;李林. 多光谱星敏感器的辐射定标与光谱反演[J]. *航天控制*, 2024(3): 61–67.

Design and Validation of a Multi-Color LED Illumination-Based Multispectral Microscopic Imaging System

Zhang Wen^{1,2}, , ^{1,2}, Li Haoming¹, , ¹, Cheng Kai¹, Zhao Yiyi^{1,2}, Chen Xiaobo¹

(1 *Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing,100049, China*)

Abstract: To satisfy the requirements for active illumination, structural compactness, and high reliability of multispectral microscopic imaging instruments for deep-space exploration, this paper designs a ring-shaped multicolor LED active illumination source and develops a multispectral microscopic imaging system based on this source. In planetary surface exploration missions, microscopic imaging systems are expected to provide both fine spatial detail and spectral information for mineral identification and material analysis. However, conventional multispectral microscopic imaging devices often suffer from a relatively large volume, limited spectral channels, and complicated mechanical structures, which make them difficult to apply in deep-space payloads under strict constraints on size, weight, power consumption, and long-term operational stability. To address these problems, this study proposes a compact active illumination scheme with multiple spectral bands and no moving parts, aiming to improve system integration and applicability in future deep-space missions. The proposed illumination source adopts a dual-ring tilted array structure concentric with the imaging optical axis. By arranging the LEDs in two concentric tilted rings, the source provides illumination from multiple directions around the sample, which helps suppress directional shadows caused by microscopic surface topography and improves the uniformity and stability of the illumination field. This structural design is especially suitable for microscopic imaging of uneven sample surfaces, where local protrusions and depressions may significantly affect image quality under conventional directional illumination. At the same time, the overall radius of the designed light source is only 35 mm, which demonstrates a high level of miniaturization and makes the source suitable for compact payload integration. The light source integrates LEDs in 14 spectral bands covering the wavelength range from 400 to 1600 nm, enabling multispectral imaging from the visible region to the near-infrared region. Such spectral coverage provides the capability to capture both morphological and spectral characteristics of target samples and supports subsequent mineral discrimination and reflectance analysis. Considering the practical limitations of single-LED irradiance output and the restricted available space in the compact source structure, an

enhancement strategy for relatively weak spectral bands is proposed. By increasing the number of LEDs or optimizing the arrangement for specific bands with insufficient irradiance, the illumination capability across different wavelengths is effectively balanced. This method improves the consistency of image acquisition conditions among multiple channels and enhances the overall usability of the multispectral system. Based on the designed illumination source, a complete multispectral microscopic imaging system is constructed. To verify its performance, spectral resolution and spatial resolution experiments are carried out. The experimental results show that the developed system can satisfy the basic detection requirements of multispectral microscopic imaging. In addition, mineral samples are selected as target objects for imaging experiments. Multispectral images are acquired in all 14 spectral bands and organized into a spectral data cube. On this basis, the reflectance spectra of the target minerals are reconstructed and compared with the corresponding measurements obtained using a spectrometer. The comparison results indicate that the reconstructed spectra are highly consistent with the spectrometer measurements in overall spectral profile and variation trend. This agreement demonstrates that the proposed system can effectively recover the spectral characteristics of the target samples and confirms the feasibility of using the ring-shaped multicolor LED illumination source in multispectral microscopic imaging applications. The results show that the proposed ring-shaped multicolor LED active illumination scheme has several advantages, including compact structure, no moving parts, high integration capability, and a relatively large number of spectral channels. It can effectively improve illumination performance under microscopic imaging conditions and support accurate multispectral image acquisition and spectral reconstruction. Therefore, the proposed design provides an effective technical solution for multispectral microscopic imaging payloads under the strict engineering constraints of deep-space exploration. It can also serve as a useful reference for the design, optimization, and system integration of illumination sources in future planetary surface exploration instruments.

Key words: deep-space detection; multispectral imaging; microscopic imaging; LED illumination; annular light source

OCIS Codes: 220.0220; 20.4820; 110.4234

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0711002