

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.010

星载多角度偏振成像仪检测方法

骆冬根^{1,2}, 张苗苗^{1,2}, 孟炳寰^{1*}, 许孙龙¹, 刘振海¹, 杨伟锋¹, 洪津¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 为实现星载多角度偏振成像仪在环境模拟测试、装星测试等场合的检测要求, 设计了一种具有多角度、多光谱和偏振性能测试光源。依据多角度偏振成像仪的工作原理及测试需求, 开展了检校光源的设计, 完成的光源方案由 29 个多波段 LED 平行光管米字型排布构成。通过光学建模, 分析了平行光管口径、发散角及安装视场, 并在辐亮度计算基础上, 完成了 LED 选型及驱动设计, 以及匀光扩散片、衰减片、偏振片及退偏器等组件设计, 实现了满足仪器多波段不同动态范围要求的均匀光斑照明及标准偏振度源输出。最终检测结果表明, 光源满足多视场点、多光谱、偏振特性测试要求, 稳定性优于 99.2%, 偏振度优于 1%, 重复安装精度优于 1 个像元; 满足载荷辐射 5%、偏振 2%、几何 1 像元的性能检测需求, 以及通道切换功能监视等要求。

关键词: 光学仪器; 测试光源; 大视场; 平行光管; 性能检测

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2019)02-0144-010

Test Method for Spaceborne Directional Polarization Camera

LUO Donggen^{1,2}, ZHANG Miaomiao^{1,2}, MENG Binghuan^{1*}, XU Sunlong¹, LIU Zhenhai¹,
YANG Weifeng¹, HONG Jin¹

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to realize the performance test of the spaceborne directional polarization camera (PDC) in the installation stage and environment simulation test, a light source with multi-angle, multi-spectral and polarization features is designed. The final design bases on the principle of the PDC instrument and test requirements is composed of 29 multi-band LED parallel light tubes arranged in a chinese character “mi”-shaped pattern. Through optical modeling, parameters of the parallel light tube diameter, divergence angle and installation field are analyzed. On the basis of radiance calculation analysis, the design of LED driver, diffusion plate, attenuator, polarizer, and depolarizer component was finished, uniform spot illumination and

基金项目: Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41405037)

作者简介: 骆冬根 (1979 -), 男, 江苏姜堰人, 博士研究生, 主要从事遥感仪器光电系统设计方面的研究。

E-mail: dgluo@aiofm.ac.cn

导师简介: 洪津 (1969 -), 男, 浙江杭州人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱、偏振遥感技术的研究。

E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2017-11-07; **修改日期:** 2018-04-03

* **通信联系人. E-mail:** bhmeng@aiofm.ac.cn

standard polarized light output were realized, the multi-spectral and different dynamic range test of the instrument were satisfied. The test results show that it meets the multi-field multi-spectral and polarized test requirements, and the stability of source is better than 99.2% within 2 hours, polarization accuracy is better than 1%, reset accuracy is better than 1 pixel. It can meet the requirements of 5% of radiation, 2% of polarization, the performance requirement of geometry 1 pixel, and the monitoring of channel switching function.

Key words: optical instrument; test light source; wide field of view; collimator; performance testing

1 引 言

偏振探测作为获取大气气溶胶特性参数的独特技术早已被科学实验所证实。因为目前常规的光学测量手段在确定大气气溶胶散射相函数、粒径及其精度方面还存在不足,而多角度偏振遥感的手段就能够较好地解决这些问题,已成为云与气溶胶探测的有效手段之一^[1-2]。中科院安光所研制了星载多角度偏振成像仪(Directional polarization camera, DPC)^[3],一种超广角画幅式的偏振成像传感器,随卫星平台运行于太阳同步轨道,能够获取大气气溶胶及云的多角度偏振成像信息,在轨工作寿命设计为 8 年。

为保证星载 DPC 的工作寿命及性能可靠性,在分系统级和整星测试阶段都需要进行各种环境模拟实验,如力学、热、真空等试验等,以考核仪器的环境适应性^[4]。DPC 光学系统主要由超广角像方远心成像物镜、滤光片-偏振片转轮、面阵 CCD 探测器三部分构成。力学振动试验可能会造成光机结构状态变化,试验前后需通过测试来验证载荷是否产生变化;热真空热试验可能引起 CCD 热噪声、暗电流的增加,试验前后需进行噪声和响应稳定性测试^[5]。因此需要相应的测试光源,监测仪器其性能变化情况。

载荷在装星前,一般采用积分球或平行光管作为实验室通用测试光源。积分球^[6]是一种较为理想的均匀漫射参考光源,亮度调节范围宽,稳定性高,是实验室辐射定标测试较为理想的光源。高精度平行光管^[7-8]用来测量光学系统焦距、视场以及成像质量等,法国的 POLDER 曾使用由 28 个平行光管组成的光学参考发生器在实验室完成了仪器的视场定标^[9]。除此之外,偏振光学传感器主要利用可调偏振度光源^[9]对偏振定标精度进行验证。为满足 DPC 主要性能监测需求,测试光源需具备偏振、几何、辐射三个特性方面的基本要求,而上述几种光源体积大、供电复杂、与卫星平台之间的安装不便,已无法满足环模实验、装星测试等场合的 DPC 测试需求,因此需要针对仪器研究合适的测试方法及对应的测试光源。

本文为实现星载多角度偏振成像仪在环模试验、整星试验等各种测试条件下的检测需求,提出了安装于遮光罩上的多波段 LED 准平行光管阵列光源的测试方法。该光源具备多角度、多光谱、偏振特性测试的功能,亮度稳定,重复安装精度高,满足测试要求,可应用于类似大视场光学遥感器的地面性能检测。

2 DPC 工作原理

DPC^[3]采用大视场光学系统加面阵 CCD 探测器,通过滤光检偏组件转动切换光谱波段和检偏方向分时获取大气偏振成像信息,光学系统结构图如图 1 所示。光学镜头主要由大口径的负透镜前组和双胶合的正透镜后组构成,前组和后组配合形成反远距结构并且构成像方远心光路。仪器对角线总视场为 118.74°,探测器为帧转移 CCD 探测器,像元数为 512 pixel×512 pixel,像元大小为 22.5 μm×22.5 μm。滤光片转轮上一共设置 8 个波段窄带滤光片,中心波长分别为 443, 490, 565, 670, 763, 765, 865, 910 nm,其中 490, 670, 865 nm 为偏振测量波段,其他为非偏测量波段。仪器的辐射测量精度为 5%,偏振测量精度为 2%。

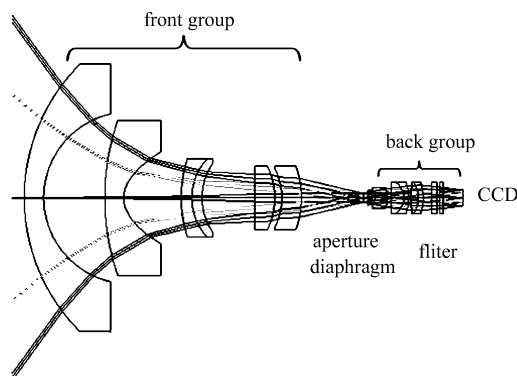


图 1 DPC 光学系统结构

Fig.1 Structure of the DPC optical system

3 DPC 测试光源的设计

本测试方法主要通过测试光源实现，因而下文中详细分析了测试需求、介绍了光源总体方案及各模块的设计过程。

3.1 测试需求

为满足星载 DPC 地面检测的需求，对测试光源的结构外形、重量、功能、控制接口、供电都提出一定的要求。光源体积小、重量轻、便于拆装；电子学设计接口简单，采用电池供电方式，电量工作时长大于 12 h；光学设计上光源各波长要处于 DPC 各通道光谱带宽内，各通道光信号避免串扰。针对地面空间环境适应性试验测试过程中对载荷性能监测要求，测试光源应具备较好的安装重复性和稳定性。

3.2 光源总体方案设计

考虑 DPC 的光谱测量范围，比较适合有卤素灯和 LED，卤素灯不仅功耗大，长时间的测试还要进行散热，除此之外，卤素灯是宽谱段光源，还需要增加滤光片。LED 的带宽约 10~20 nm，且具有光效高、寿命长、体积小、重量轻等优点，因此采用多种波长的 LED 作为发光单元。由于需要测试载荷的几何特性变化，采用准平行光入射以降低对位置重复安装精度的要求。测试光源安装于光机头部的遮光罩上，与遮光罩通过特制锥度螺钉实现自定位配合。

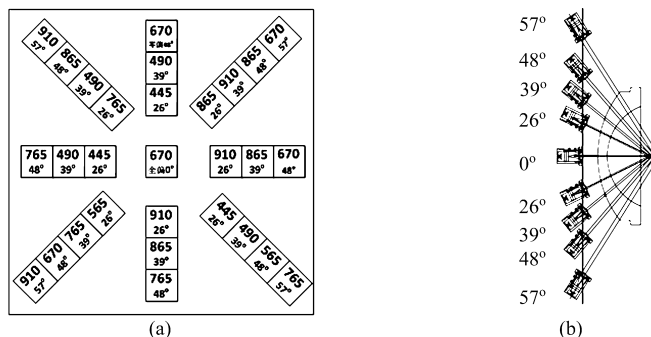


图 2 测试光源总体设计示意图。(a) 光源波段及视场分布图，(b) 多视场点设计

Fig.2 General design of the light source. (a) Wavelengths and viewing angles distribution of the light source, (b) Multi-field design

LED 光管排布为米字型，考虑光源整体重量和镜筒间遮挡问题，沿轨穿轨方向设置 4 个视场角，0°、

26°、39°、48°, 对角线方向增加一个 57°。由于 DPC 分孔径分视场成像特点, 对平行光管的位置和入射角度的匹配要求高, 因此, 多视场点的设计应该着重考虑这一点。为验证仪器装星后的偏振测量精度, 在偏振波段某些视场光管的前端加线偏振器 (理论偏振度为 1) 及退偏器 (理论偏振度为 0)。最终测试光源含有 29 个平行光管, 每一个平行光管提供一个具有一定发散角的均匀面光源, 提供 8 种方位角下各 5 种的视场角的照明排布, 其波长序列及视场设计结果如图 2(a) 所示, 多视场点设计如图 2(b) 所示。

图 3 是平行光管光路示意图, LED 发出的光经乳色玻璃匀光, 形成较为均匀的面扩展光源, 再经过针孔光阑形成均匀的小点源, 最终经准直透镜准直, 形成具有一定发散角的平行光。可根据每个波段 LED 的亮度, 加衰减片进行调节, 以使用 DPC 的动态范围。

3.3.1 发散角设计

为实现合适大小的光斑照明, 便于对光斑重心进行分析, 对发散角进行了分析计算。模型如下:

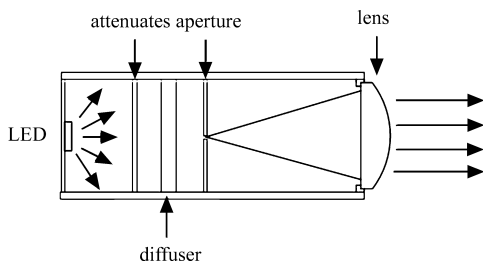


图 3 平行光管光路示意图

Fig.3 Optical diagram of the collimator

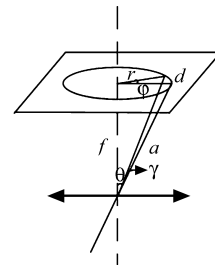


图 4 理想光学系统成像模型

Fig.4 Model of ideal optical imaging system

一束具有发散角的平行光束在面阵 CCD 上的成像可由图 4 简单表示, 其中 θ 为入射光的视场角, φ 为像面方位角, r 为像面半径, d 为像面弧长, f 为光学系统的焦距, γ 为平行光管的发散角, 则图中的几何关系可以表示为

$$\begin{aligned} r &= f \tan \theta, \\ d &= r \varphi, \\ \gamma &= \frac{d \cos \theta}{f}. \end{aligned} \tag{1}$$

对上式微分可得到平行光管照射下仪器子午方向和弧矢方向单像元对应的视场角分别为

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= \frac{\Delta r \cos^2 \theta}{f}, \\ \Delta \gamma &= \frac{\Delta d \cos \theta}{f}, \end{aligned} \tag{2}$$

式中 $\Delta \theta$ 为子午方向单像元对应的视场角, $\Delta \gamma$ 为弧矢方向单像元对应的视场角。

CCD 的像素大小为 $22.5 \mu\text{m} \times 22.5 \mu\text{m}$, 光学系统的焦距为 4.8 mm, 则单像元对应的子午和弧矢方向的角度曲线如图 5 所示。由图可知, 零视场子午和弧矢单像元对应的角度相同, 则实际成像光斑是圆形; 随着视场的增加, 单像元对应的角度减小, 且子午减小幅度比弧矢的大, 则在边缘视场实际成像光斑为椭圆。实际光斑测试结果见图 11, 与理论分析一致。最终发散角设计为 $\pm 1.33^\circ$, 中心视场可照亮 $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$ 左右, 边缘约 $15 \text{ pixel} \times 35 \text{ pixel}$, 满足光斑重心计算的要求。

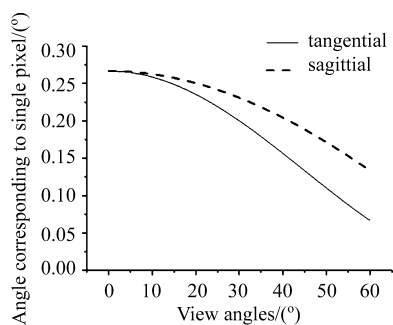


图 5 单像元对应的角度随视场角的变化

Fig.5 Angle corresponding to single-pixel with view angles

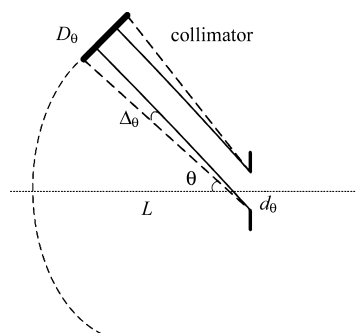


图 6 平行光管直径估算

Fig.6 Diameter of collimator estimating

3.3.2 平行光管有效口径设计

假设平行光管出口到 DPC 入瞳的距离为 L , 入瞳大小为 d_θ , 平行光管入射 DPC 的视场角为 θ , 平行光管的发散半角用 $\Delta\theta$ 表示, 则所需最小平行光管的有效口径可以表示为^[10]

$$D_\theta = 2L\Delta\theta + d_\theta \cos \theta . \tag{3}$$

由 (3) 式可知, 平行光管直径与出光口到 DPC 入瞳的距离 L , 入瞳大小 d_θ , 以及视场角有关。通过 ZEMAX 仿真可知, DPC 入瞳位置和入瞳口径与波段和视场有关, 如表 1 所示, 限于篇幅这里只给出两个波段数据。DPC 光学镜头子午入瞳直径大于弧矢入瞳直径, 所以估算最小平行光管口径时, 直接采用子午面数值即可。

平行光管出光口到透镜第一面距离 x 为 25 ± 5 mm, $L = l + x$, 其中 l 是光学系统的入瞳位置, 则最小平行光管直径与视场角之间的关系如图 7 所示。由图 7 可知, 为了充满 DPC 的入瞳, 平行光管的最小口径理论上可以定为 8.5 mm。但是考虑安装误差、装配等因素的影响, 最后把平行光管直径设计为 16 mm。

表 1 DPC 光学系统在不同波段、不同视场下的入瞳位置和入瞳半径

Table 1 Entrance pupil position and pupil diameter of DPC optical system in different bands and different viewing angle

Wavelength(nm)		Viewing angle(°)					
		0	15	30	45	50	57
565	pupil position(mm)	88.21	88.56	89.87	93.34	95.49	99.83
	tangential pupil(mm)	0.604	0.673	0.94	1.735	2.284	3.541
	sagittal pupil(mm)	0.604	0.626	0.699	0.857	0.942	1.103
910	pupil position(mm)	88.85	89.23	90.67	94.45	96.72	101.3
	tangential pupil(mm)	0.604	0.674	0.945	1.75	2.298	3.510
	sagittal pupil(mm)	0.604	0.626	0.7	0.861	0.947	1.108

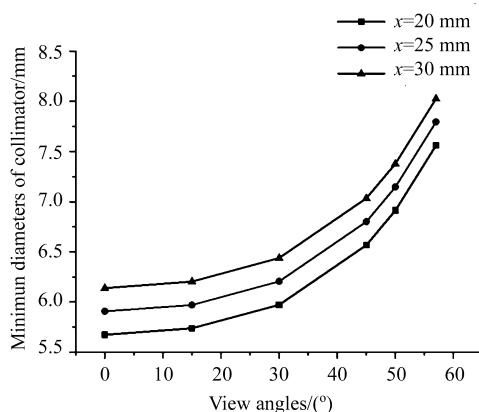


图 7 最小平行光管直径与视场角之间的关系图

Fig.7 Relationship between the viewing angle and the minimum diameter

3.4 LED 发光单元设计

为满足仪器光谱波段及动态范围要求, 选择了以下 7 种不同波段的 LED, 经过实测, 光源工作在 LED 线性区, DPC 像元上的光强转化成显示输出的 (digital number, DN) 值为 5000~8700 (饱和值 9500), 主要参数如表 2 所示。LED 对温度比较敏感, 波长温度系数最大为 0.1 nm/°C, 发光通量相对变化率最大约为 1%/°C^[11], 因此, LED 发光单元采用了 5050 的封装结构, 结构背面设计了金属导热片, 在焊盘和金属片空隙中注入绝缘的导热胶, LED 底部通过导热胶与金属片直接传输热量, 有利于提高光源的稳定性。

表 2 LED 电子学和光学特性参数

Table 2 Electrical and Optical Characteristics of LEDs

Model No.	Peak wavelength (nm)	Luminous intensity (Iv)	View angle (°)	Current (mA)	DPC DN value
JX5050/445	445	1200 mcd	±60	7.7	7500
JX5050/490	490	4500 mcd	±60	19.8	6800
JX5050/565	565	500 mcd	±60	17.6	7500
JX5050/660	660	350 mcd	±60	6.6	7000
JX5050/765	765	15 mW/sr	±60	6.8	8300
JX5050/850	850	30 mW/sr	±60	10.6	6600
JX5050/910	910	18 mW/sr	±60	16.5	7600

3.5 LED 驱动电路设计

光源驱动器是光源重要的组成部分, 它可以给每一路 LED 模块提供稳定的电流, 并且可以精确地调节每一路电流的大小。驱动控制器电子学框图如图 8 所示, 可以分为 5 个模块: 主控模块、LED 驱动控制模块、交互界面、电源模块和串口通信模块。主控芯片采用 STM32F103ZET6, 实现了多路不同占空比的 PWM 信号输出以及接口通信等; 采用恒流驱动, 实现不同 LED 亮度等级的精细调节; 上位机实现与驱动控制器的串口通讯。

基于以上计算分析及设计, 完成了测试光源的研制, 组件基本由三个部分组成: 光机头部、电源和光源驱动控制器。光源系统如图 9 所示。

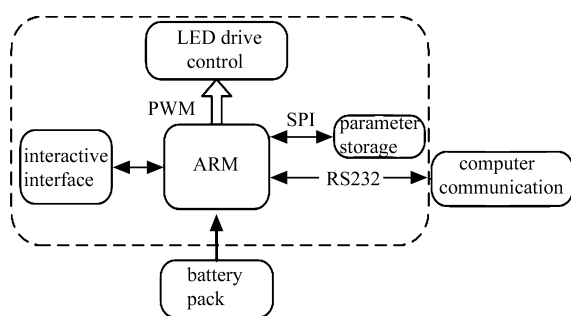


图 8 驱动控制器电子学框图

Fig.8 Electric diagram of drive controller

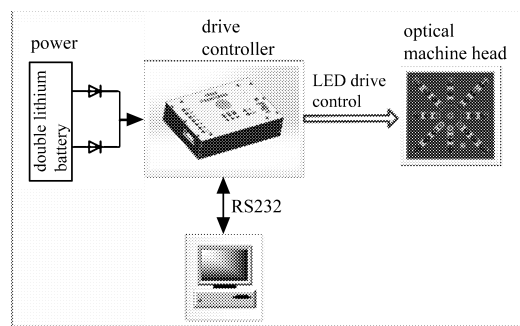


图 9 测试光源系统图

Fig.9 System diagram of the light source

4 星载 DPC 测试光源的性能检测

光源的稳定性定义为输出特性的时间稳定性、重复性，稳定性测试通过绝对光谱标准探测器^[12]实现。通过 DPC 工况下多谱段视场分布测试，能够监测滤光片转轮是否正常切换。通过对多次安装的偏差进行分析，完成了安装重复精度的测试，符合对 DPC 成像几何稳定性的监测要求。最后，偏振度测试完成了 DPC 偏振解析精度的监测。总体达到了装星测试光源设计的预期目标。

4.1 光源稳定性

测试光源开机预热 30 min 后，使用标准探测器以 1 s 间隔持续测量 2 h，其输出相对于均值的起伏小于 0.8%，则稳定性优于 99.2%，各波段测试结果如表 3 所示。图 10 给出了具有代表性的 670, 765 nm 两个波段的稳定性测试曲线。满足对 DPC 辐射精度 5% 的监测需求。

表 3 各波段稳定性数据

Table 3 Measurement result of stability

Wavelength (nm)	Parameter						
	443	490	565	670	765	865	910
Stability(%)	99.42	99.30	99.64	99.20	99.63	99.21	99.40

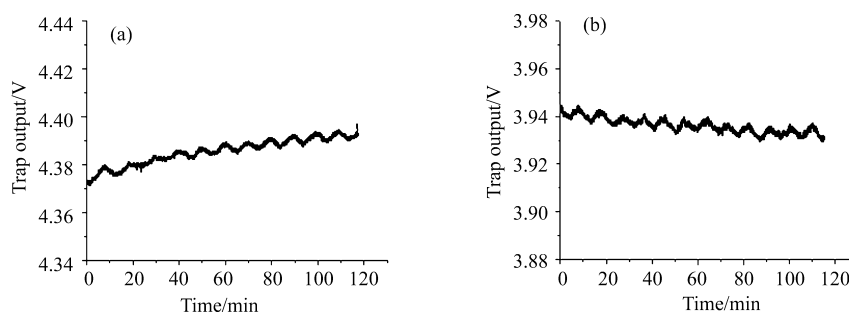


图 10 稳定性测试图。(a)670 nm; (b) 765 nm

Fig.10 Measurement graph of stability. (a) 670 nm; (b) 765 nm

4.2 多波段多视场点测试

将测试光源安装至 DPC 遮光罩上，采集各个通道图像并保存，测试光源实物图如图 11(a) 所示，测试现场图如图 11(b) 所示，(c) 图是 490 nm 通道成像图，(d) 图是各通道成像光斑合成图。各波段图像光

斑位置已知且不同, 分析各个视场点对应的 LED 光源图像, 可据此判定载荷的成像功能和波段切换功能是否正常, 且整个光源可覆盖载荷 95% 以内各方向的视场, 可做视场测试判据。测试结果满足多波段多视场点的设计要求。

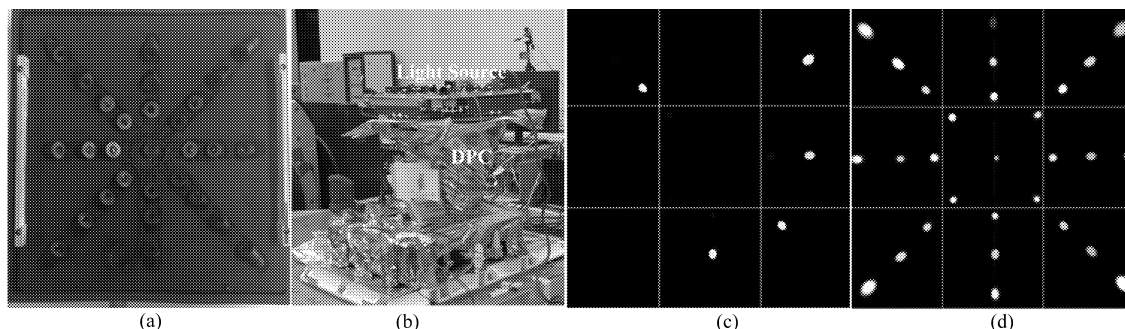


图 11 测试光源图。(a) 测试光源实物图, (b) 测试光源性能检测现场图, (c) 490 nm 通道成像图, (d) 各通道成像光斑合成图

Fig.11 Diagram of the light source. (a) Light source object diagram, (b) performance test of the light source, (c) 490 nm channel imaging, (d) channel synthesizer imaging map

4.3 重复安装精度

将光源多次重复安装到 DPC 遮光罩上, 光源与遮光罩通过特制锥度螺钉配合实现定位, 采集并保存图像, 求取各波段光斑质心, 计算多次安装质心位置偏差。如表 4 所示, 多次安装的最大统计偏差值在 1 pixel 以内, 满足成像几何位置变化监测的要求。

表 4 多次安装偏差

Table 4 Multiple installations deviation

Δ (pixel)	Wavelength (nm)						
	443	490	565	670	765	865	910
Δx	0.09	0.29	0.28	0.20	0.36	0.21	0.03
Δy	0.08	0.16	0.60	0.21	0.33	0.17	0.28

4.4 DPC 偏振测量精度验证

由于光源在 670 波段零视场和 48 度视场分别设置了全偏器和零偏器, 即预设理论偏振度分别为 1 和 0。抽样选取测试数据计算偏振度与预设偏振度进行对比, 得到偏振度偏差, 从而验证 DPC 偏振测量精度。从测量对比结果可以看出, 测试光源偏振度为 1 时, 波段 670 nm 测量的偏振度与预设偏振度的偏差范围为 0.35%~1.25%, 平均偏差为 0.74%; 测试光源偏振度为 0 时, 波段 670 nm 测量的偏振度与预设偏振度的偏差范围为 0.17%~0.64%, 平均偏差为 0.53%。结果表明, 仪器测量的偏振度与实际输入的偏振度偏差均小于 1%, 即偏振测量精度优于 1%, 满足对仪器偏振测量精度 2% 的监测要求, 实际测量结果如表 5 所示, 其中 P_C 为设计偏振度, P_M 偏振度测量值; $|P_M - P_C|$ 为偏振度设计值和测量值的偏差。

5 结 论

根据大视场、多光谱偏振成像遥感器 DPC 的特点, 研究了基于多波长 LED 光管多视场阵列的测试光源的测试方法, 介绍了该光源设计方案, 计算分析了平行光管发散角、口径、能量等参数, 设计了高稳

表 5 DPC 测量的偏振度及其误差

Table 5 Degree of polarization of DPC measurement and its deviation

Wavelength(nm)	View (°)	P_C (%)	P_M (%)	$ P_M - P_C $ (%)	Average deviation
670	0	100	98.74	1.25	0.74%
		100	99.64	0.35	
		100	99.44	0.55	
	48	0	0.17	0.17	0.53%
		0	0.52	0.52	
		0	0.64	0.64	

定性的光源驱动电路, 结构上实现了针对载荷安装接口的轻量化及高精度重复定位。最后对光源进行了自身性能测试以及和 DPC 的双向验证, 2 h 内光源稳定性优于 99.2%, 重复安装精度优于 1 pixel, 满足 DPC 在地面功能测试和性能检测要求。下一步将增加消杂光光阑以减小镜筒和透镜边缘散射杂光影响, 以及优化透镜像差以提升光斑的均匀性。

参考文献:

- [1] Gu Xingfa, Chen Xingfeng, Cheng Tianhai, *et al.* In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(7): 172-179(in Chinese).
顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(7): 172-179.
- [2] Marbach T, Riedi J, Lacan A, *et al.* The 3MI Mission: Multi-viewing-channel-polarisation imager of the EU-METSAT polar system: second generation (EPS-SG) dedicated to aerosol and cloud monitoring [C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9613**: 961310.
- [3] Yang Weifeng, Hong Jin, Qiao YanLi. Optical Design of Spaceborne Directional Polarization Camera [J]. *Acta Optical Sinica*, 2015, **35**(8): 285-292(in Chinese).
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, **35**(8): 285-292.
- [4] Lu E, Yan Changxiang, Wu Qingwen, *et al.* Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments [J]. *Chinese Journal of Optical and Applied Optics*, 2009, **2**(5): 364-376(in Chinese).
卢镔, 颜昌翔, 吴清文, 等. 空间光学传感器环境适应性设计与试验研究 [J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(5): 364-376.
- [5] Dong Jingyu. A review on spacecraft environment experiments in China and some proposals [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, **25**(3): 237-241(in Chinese).
童靖宇. 我国空间环境试验的现状与发展建议 [J]. *航天器环境工程*, 2008, **25**(3): 237-241.
- [6] Lin Guanyu, Yu Xiangyang. High precision intelligent calibration device of visible/near-infrared integral sphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(8): 2520-2525(in Chinese).
林冠宇, 于向阳. 高精度智能化可见 / 近红外积分球辐射定标装置 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(8): 2520-2525.
- [7] Fryc I, Brown S. W., Ohno Y. A Spectrally tunable LED sphere source enables accurate calibration of tristimulus colorimeters [C]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6158**: 61580E.

- [8] Gao Minghui, LI Lifu, *et al.* Design of a new kind of multi-waveband large aperture parallel light pipe [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 698-701(in Chinese).
高明辉, 李丽富, 等. 一种新型多波段大口径平行光管的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 698-701.
- [9] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument [C]. *Proceedings of SPIE*, 1995, **2553**: 218-231.
- [10] Chen Ligang. *Study of Laboratory Calibration of the Airborne Polarization CCD Camera with Wide Field of View* [D]. Hefei: Doctorial Dissertation of Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 50-56(in Chinese).
陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士论文, 2008. 50-56.
- [11] Ding Tianping, Guo Weiling, Cui Bifeng, *et al.* The Effect of Temperature on the PL Spectra of High Power LED [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*. 2011, **31**(6): 1450-1453(in Chinese).
丁天平, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 温度对功率 LED 光谱特性的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*. 2011, **31**(6): 1450-1453.
- [12] Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, *et al.* Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 749-752(in Chinese).
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(6), 749-752.