

便携式多通道辐射参考光源的设计与测试

李孟凡^{1,2*}, 胡亚东^{1,2*}, 崔珊珊^{1,2}, 于新宇^{1,2}, 裘桢炜^{1,2}, 厉卓然^{1,2},
王相京^{1,2}, 张爱文^{1,2}, 孙晓兵^{1,2}

¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²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

摘要 星载同步监测大气校正仪(SMAC)用于获取遥感图像中时间同步、空间匹配的多光谱偏振大气信息,为高分辨率遥感图像的大气校正提供了气溶胶、水汽等微物理参数。为满足 SMAC 环境试验过程中现场光学性能标定的需要,设计了一种便携式多通道辐射参考光源(PMRLS)。PMRLS 采用与 SMAC 一致的多通道光学设计,且各通道均为独立发光组件。发光组件采用发光体配合扩散板形成均匀照明,在可见近红外波段、短波红外波段分别选用 LED 和小功率卤钨灯作为发光体以降低整体功耗,采用低噪声稳定电流源驱动光源,结合散热片和风扇的散热设计以保证光源温度稳定性,并通过结构限位固定结构位置关系以提高光源测试的重复性。通过 PMRLS 应用对象,即 SMAC,将积分球光源的辐亮度直接等效传递至 PMRLS,并进行了非稳定度、非重复度评价。性能测量结果显示,SMAC 地面检测光源各通道输出能量与 SMAC 动态范围典型辐亮度值的偏差在 7%之内,非稳定度优于 0.76%,非重复度优于 1.3%,测量结果表明研制的 PMRLS 能够满足 SMAC 性能快速监测的需求。

关键词 大气光学; 性能监测; 多通道辐射参考光源; 性能测试

中图分类号 V557+.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2001003

Design and Testing of a Portable Multichannel Reference Light Source

Li Mengfan^{1,2}, Hu Yadong^{1,2*}, Cui Shanshan^{1,2}, Yu Xinyu^{1,2}, Qiu Zhenwei^{1,2},
Li Zhuoran^{1,2}, Wang Xiangjing^{1,2}, Zhang Aiwen^{1,2}, Sun Xiaobing^{1,2}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Sciences,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The space-borne synchronous monitoring atmospheric corrector (SMAC) is a sensor that can obtain real-time spatial multispectral polarization information of the atmosphere. In this way, aerosol and water vapor parameters that are then used for the atmospheric correction of high-spatial-resolution images can be provided. A portable multichannel reference light source (PMRLS) was designed to evaluate the optical performance of the SMAC during environmental testing. The multichannel design of this source was consistent with that of the SMAC and had independent luminous components corresponding to each channel. A luminous element was equipped with a semitransparent diffuser plate, thus, enabling the luminous components to produce uniform illumination. To reduce the power consumption, a light-emitting diode and halogen tungsten lamp were chosen as the luminous elements at the visible and near-infrared band and the short-wave infrared band, respectively. The luminous element was driven by a low-noise stable current and cooled by an electric fan and cooling fin so as to improve the temperature stability of the PMRLS. In addition, the position of the PMRLS was limited by design to improve its repeatability. The radiance adjustment and performance testing for the PMRLS were performed using the SMAC. The maximal deviation in the radiance found during the PMRLS's radiance adjustment was within 7%, and the instability and non-repeatability values were less than 0.76% and 1.3%, respectively. Overall, therefore, the performance of the PMRLS meets the requirements for a quick evaluation of the SMAC.

Key words atmospheric optics; performance monitor; multichannel reference light source; performance test

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-05-14; 录用日期: 2020-07-03

基金项目: 王宽诚率先进入人才计划“卢嘉锡国际团队项目”(GJTD-2018-15)

* E-mail: huyadong@aiofm.ac.cn

1 引 言

地球是一颗表面包围着浓密大气的行星,大气中的气溶胶、水汽等成分对太阳辐射有较强的吸收、散射等作用。星载光学遥感器接收到的地物目标信息不可避免地受到大气的干扰,导致星载遥感相机观测图像出现模糊,图像质量严重下降。随着高分辨率遥感应用的不断发展,搭载的大气参数探测载荷可对同平台遥感相机图像进行大气校正,已成为高分辨率光学卫星传感器中的重要配置^[1-6]。中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的星载同步监测大气校正仪(SMAC),通过分孔径光学系统实现了可见至短波红外波段的多光谱偏振探测,获取到同平台星载光学遥感相机同时刻、同区域的大气参数,通过大气辐射传输计算,对遥感图像进行大气校正,实现了遥感图像质量的有效提升^[5-7]。

大气参数的精确获取是遥感图像大气校正的前提,SMAC受到卫星资源的严苛限制而未配置星载定标器,因此需要具备较高的自身稳定性,同时需结合在轨性能测试,来保证在轨辐射、偏振等观测能力。SMAC在轨观测原始数据需要结合辐射、偏振定标参数进行定量处理,基于这一数据可解算出观测目标的辐射、偏振信息,进而反演得出目标区域的大气参数^[8]。SMAC的辐射、偏振定标参数在研制阶段通过实验室定标获取,SMAC发射入轨后,其辐射、偏振定标参数则通过在轨定标进行确认和更新。SMAC入轨初期在缺乏完善的在轨定标数据的情况下,需要使用实验室定标参数完成物理量纲的转换,从而进行图像大气校正最终应用的性能评估。然而,卫星发射及入轨后面临的力学、真空热环境等均可能导致遥感器自身定标参数发生变化^[9],进而影响其在轨初期数据的定量应用。

环境试验是验证星载产品环境适应性,是考核定标参数保持性能的有效方法。在SMAC环境试验前后的辐射响应度监测,能够有效地反映其光学、结构、电子学的状态,从而验证产品对环境试验的性能保持能力,通常要求各波段辐射响应的相对变化在5%以内。目前光学遥感器的实验室辐射响应度测试,通常采用积分球光源,其具有出光均匀、光谱范围宽、动态范围大等优点,可覆盖SMAC全部观测光谱范围、动态范围,并充满各通道观测视场,具有良好的稳定性、重复性等性能^[10-11]。但是,将积分

球光源用于SMAC的试验场景实时性能监测时存在诸多问题:1)积分球及其电源、控制器等配件体积大、质量大,整体运输和拆卸、组装等都费时费力;2)SMAC谱段较多,积分球输出能量需要多次调整才能满足各通道动态范围的要求;3)对于装星后的产品,因产品受高度和操作空间的限制,积分球无法使用。为此,本文研制了一种便携式多通道辐射参考光源(PMRLS),相比于传统的积分球光源,PMRLS能够进行SMAC全波段的同时监测,具有便携、易操作、效率高的特点,实现了SMAC地面性能的快速、有效监测。

2 PMRLS 工作原理

2.1 PMRLS 组成和工作原理

PMRLS主要由光源头部、控制模块以及电池三个部分组成,整体构成及工作原理如图1所示。光源头部绝缘,安装于SMAC遮光罩前端,其作用是为SMAC各通道同时提供稳定的辐射能量;控制模块主要用于产生稳定的电流,驱动光源头部稳定输出,辐射能量大小可通过上位机进行调试;电池的作用是为控制盒供电。

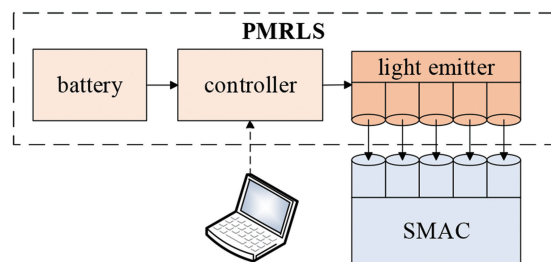


图1 便携式多通道辐射参考光源的整体构成及工作原理图
Fig. 1 Overall structure and working principle of PMRLS

这种分离式设计可有效避免增加光源头部的体积和质量,在某些特殊条件如高空、操作空间受限的使用环境下,能够有效降低安装难度和风险。

2.2 主要技术指标

根据SMAC地面性能跟踪监测的科学需求,设定PMRLS的主要技术指标,如表1所示。其中,第一项代表PMRLS能量调整完毕后与目标能量之间的偏差,光源调整完毕后,各通道电流即为定值,SMAC对PMRLS的观测值也基本固定,光源性能主要受表1后两项因素的影响。因此PMRLS各通道输出能量仅需保证在合理范围内即可(避免能量过低,使得SMAC信噪比或能量过强,导致SMAC

饱和)。本文中光源能量调整目标为 SMAC 动态范围典型值。

表 1 PMRLS 主要技术指标

Table 1 Technical specification of PMRLS unit: %

Parameter	Tolerance
Error of energy adjustment	±10
Non-stability	1
Non-repeatability	2

综合考虑表 1 各项指标及安全、实用性, PMRLS 应主要满足以下几点要求: 1) 辐射能量稳

定, 2) 重复性好, 3) 输出能量可调, 4) 便携、易操作, 5) 安全。

3 PMRLS 的设计

3.1 光源头部的设计

PMRLS 的头部设计为盒体式结构, 包括发光组件、散射风扇、框架等, 光源头部结构以及安装效果如图 2 所示。光源头部大小仅为 358 mm × 75 mm × 80 mm, 质量小于 2 kg, 便于日常运输和拆装操作。

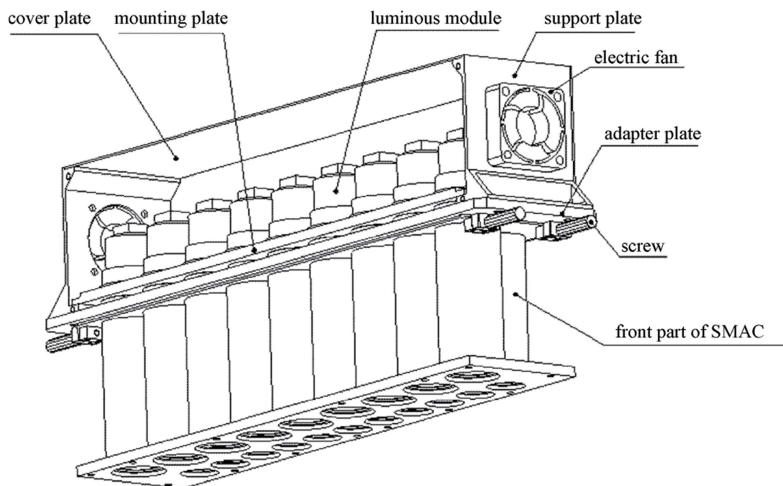


图 2 便携式多通道辐射参考光源头部结构及安装效果图

Fig. 2 Head structure of PMRLS and the effect after installation

PMRLS 发光组件数量与 SMAC 通道数一致, 各发光组件与 SMAC 通道的谱段、位置一一对应, 使得 PMRLS 能够同时进行 SMAC 所有通道的测试。发光组件主要由发光体、扩散片、散热片、组件筒组成, 剖面结构如图 3 所示。发光组件输出能量的谱段决定于发光体的类型和工作波段, 由于卤钨灯发出的光在较短波段能量较弱, 且 LED 相比于卤钨灯更加节能。为降低光源的功耗, 波长在 1000 nm 之下的光源选取与 SMAC 谱段匹配的 LED 作为发光体, 反之选用卤钨灯, 选用的发光体参数及对应 SMAC 谱段见表 2, 其中, JX5050/850 型号 LED 峰值波长与 SMAC 的 870 nm 谱段存在一定偏离, 本研究仅使用这一 LED 的部分边缘光谱, 如图 4 所示。保证 SMAC 对应波段的响应全部稳定在动态范围指定附近点, 该情况并不影响光源的使用, PMRLS 对 SMAC 性能跟踪监视的有效性主要依赖于光源整体的稳定性及重复性等。扩散片位于组件筒出光口一侧, 目的是将发光体发出的直射光转换为较均匀的漫射光, 进而有效减小 PMRLS 重复安装时因位置偏差引起的重复性误差。

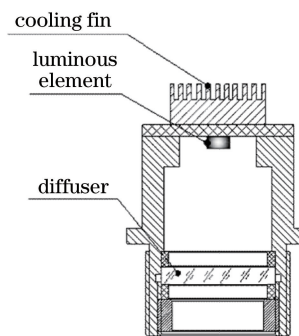


图 3 发光组件结构

Fig. 3 Structure of luminous module

发光体设置散热片, 同时添加风扇, 以加快循环空气持续带走热量, 实现了发光体的持续散热冷却, 进而确保光源头部各通道输出辐射能量的稳定性, 并延长了地面检测光源的使用寿命。

框架用于光源头部整体的支撑、固定, 其底部与 SMAC 的接触面设计了凹陷台阶, 凹陷形状与 SMAC 前端面相匹配, 形成结构限位, 保证了光源头部多次拆卸安装的位置重复性。通过框架底部的 4 只螺钉即可轻松将光源头部固定于 SMAC 前端。

表 2 发光体参数

Table 2 Parameters of luminous elements

unit: nm

Type	Center wavelength of luminous element	Bandwidth of luminous element	Center wavelength of SMAC	Bandwidth of SMAC
JX5050/490	488	26	490	20
JX5050/565	578	120	550	20
JX5050/670	661	20	670	20
JX5050/850	839	37	870	40
JX5050/910	901	72	910	20

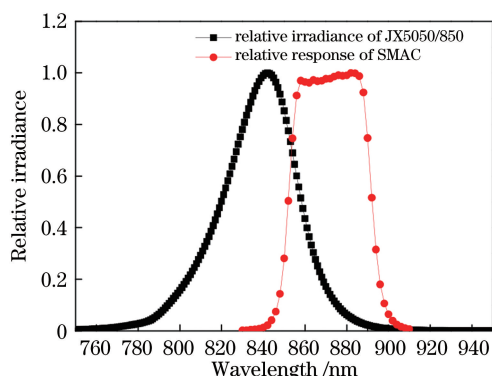


图 4 PMRLS 与 SMAC 870 nm 波段相对光谱曲线
Fig. 4 Relative spectrum data of PMRLS and SMAC at 870 nm waveband

对光源头部的金属结构全部进行了黑色阳极化处理,并在产品接触面贴了橡胶绝缘材料,这样既避免了光源对产品表面产生损伤,又实现了光源与产品的电绝缘,有效地保障了产品的安全。

3.2 控制模块的设计

光源的稳定主要靠电源和环境因素来控制,LED 和卤钨灯驱动电流的稳定性是首先需要考虑的因素,在此基础上进一步通过系统的热设计保证光源的温度稳定性。设备采用商用的锂电池个人计算机充电电源,电池容量为 20 Ah,输出电压为 12 V,测得的工作电流为 2.88 A,功率约为 34.58 W,可以连续使用 5 h 以上。

光源控制模块主要是设计低噪声、稳定的驱动电路;驱动电路采用模拟电路驱动方式,由微控制单元(MCU)控制数模转换器(DAC)输出控制电压,经电压/电流转换模块实现稳定的恒流输出(图 5),从而实现发光体的恒流驱动。在环境条件相对稳定的实验场所,驱动电路的电流输出的稳定性主要受电流采样电阻稳定性的影响,设备采用高稳定性的电流传感电阻:WFMB2512R1000FEA,具有 $20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 温度稳定性,小于 $25 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ 的热阻,在 LED

工作电流小于 100 mA 条件下热功耗为 0.001 W,温升 $0.025 \text{ } ^\circ\text{C}$,电阻变化 $5.00 \times 10^{-7} \text{ } \Omega$,对应电流同样改变 $5.00 \times 10^{-7} \text{ A}$,可以忽略其对光源稳定性的影响。其中,每路 DAC 的输出均能够通过上位机进行调整,进而实现 PMRLS 各通道的辐射能量的调整。同时,驱动电路也为散热风扇供电。

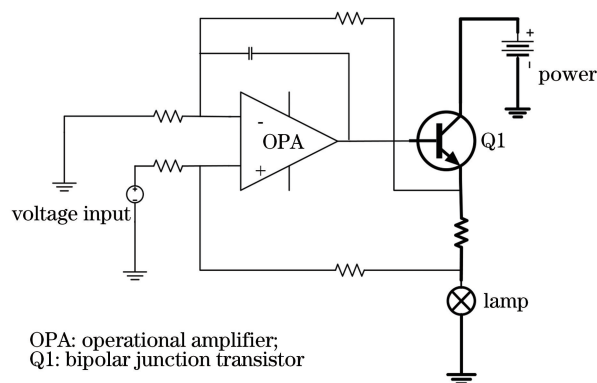


图 5 驱动电路 VI 转换模块原理图

Fig. 5 Schematic of VI conversion module of drive circuit

控制模块采用电池供电,这种独立供电的方式能够隔绝 PMRLS 与其他设备之间的联系,进一步提高安全性的同时也不必再考虑测试现场的供电条件。

4 PMRLS 的测试与分析

4.1 辐射能量调试与分析

PMRLS 辐射能量的调试依赖于各通道输出能量的有效探测。PMRLS 各通道的集成性较高,且并非朗伯辐射源,因此,传统的辐亮度计在测量时不仅易受到其他通道辐射能量的干扰,而且其观测区域与 SMAC 的差异也使两者接收到的能量不同,所以传统的测试方法不适用于 PMRLS 辐射能量的调试。针对 PMRLS 上述特点,本研究采用 PMRLS 的应用对象,即已标定的 SMAC(其主要辐射性能参数见表 3,表中 P 表示偏振波段),直接将积分球

辐射源各波段的辐亮度传递至 PMRLS,使 SMAC 各通道响应全部处于动态范围指定点附近。这种方法能够同时完成 PMRLS 全部通道的输出能量测量,并且可以直观反映 SMAC 的响应情况。

表 3 SMAC 性能参数
Table 3 Parameters of SMAC

Center wavelength /nm	Non-linearity / %	Non-stability / %	Calibration uncertainty / %
490(P)	0.45	0.05	2.35
550	0.64	0.02	2.44
670(P)	0.43	0.01	2.28
870(P)	0.37	0.01	2.03
910	0.37	0.01	1.99
1380	0.72	0.15	2.34
1610(P)	0.27	0.06	1.79
2250(P)	0.08	0.03	1.98

PMRLS 能量调试的主要过程如下:

表 4 PMRLS 能量调试偏差

Table 4 Errors of energy adjustment for PMRLS

Center wavelength /nm	490	550	670	870	910	1380	1610	2250
$T_{i,j}$	11731.5	9714.0	7752.0	6852.0	7012.9	13846.6	6955.0	6145.1
$S_{i,j}$	12538.7	9959.4	7218.2	7047.5	7095.2	14367.7	6587.1	5741.1
Error / %	6.88	2.53	-6.89	2.85	1.17	3.76	-5.29	-6.57

4.2 非稳定度、非重复度测试与分析

PMRLS 光源对 SMAC 的性能监视不确定度主要来源于光源自身的非稳定度、非重复度等因素。使用 SMAC 进行能量监测的方法同样适用于 PMRLS 中其他指标的测试。将 SMAC 与 PMRLS 预热稳定后,令 SMAC 对光源持续观测 1.5 h 以上,将观测信号按(2)式进行统计,得出 PMRLS 各通道辐射非稳定度 $E_{i,j,ns}$ 均优于 0.17%,非稳定度测试曲线如图 6 所示。

$$E_{i,j,ns} = \frac{1}{D_{i,j,average}} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (D_{i,j,k} - D_{i,j,average})^2}{M-1}} \times 100\%, \quad (2)$$

表 5 PMRLS 非稳定度、非重复度测试结果

Table 5 Non-stability and non-repeatability of PMRLS

Center wavelength /nm	490	550	670	870	910	1380	1610	2250
Non-stability	0.14	0.05	0.08	0.08	0.07	0.07	0.17	0.09
Non-repeatability	0.90	1.29	1.01	1.12	1.18	0.62	0.54	0.69
Combined uncertainty	0.91	1.29	1.01	1.12	1.18	0.62	0.57	0.70

1) 调整积分球辐射源能量,使其辐亮度接近 SMAC 各通道动态范围指定值,记录 SMAC 对积分球光源的响应,根据 SMAC 线性响应的特性,换算出指定辐亮度下 SMAC 的目标响应值,表达式为

$$T_{i,j} = \frac{D_{i,j}}{L_j} \times L_j^*, \quad (1)$$

式中: $T_{i,j}$ 为 SMAC 第 j 波段、第 i 通道,在动态范围指定辐亮度 L_j^* 下的目标响应信号; $D_{i,j}$ 为 SMAC 第 j 波段、第 i 通道,在辐亮度 L_j 下的响应信号。

2) PMRLS 限位安装至 SMAC 后,将 SMAC 各通道响应信号与目标信号进行对比判断,通过上位机调整 PMRLS 发光体亮度,并微调发光体姿态以改变出光口能量分布,使得 SMAC 任意探测器像元的最终响应信号 $S_{i,j}$ 均与目标信号相匹配。PMRLS 能量调试结果如表 4 所示,各通道能量调试偏差均在 $\pm 7\%$ 以内,满足应用需求,其中,PMRLS 的能量调试不确定度来源于 SMAC 绝对辐射定标不确定度,即小于 2.44%。

式中: M 为观测总次数; $D_{i,j,k}$ 为第 k 次观测时的响应信号; $D_{i,j,average}$ 为 M 次观测响应信号的均值。

将 PMRLS 限位安装于 SMAC,采集 SMAC 各通道观测信号,重复拆装若干次,得出 PMRLS 各通道非重复度均优于 1.3%,非重复度表达式为

$$E_{i,j,nr} = \left(\frac{\max D_{i,j,n}}{\min D_{i,j,n}} - 1 \right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $E_{i,j,nr}$ 为非重复度; $\max D_{i,j,n}$ 、 $\min D_{i,j,n}$ 分别为 n 次测试响应信号中的最大值、最小值。

PMRLS 非稳定度、非重复度测试结果如表 5 所示,均满足表 1 的研制要求。

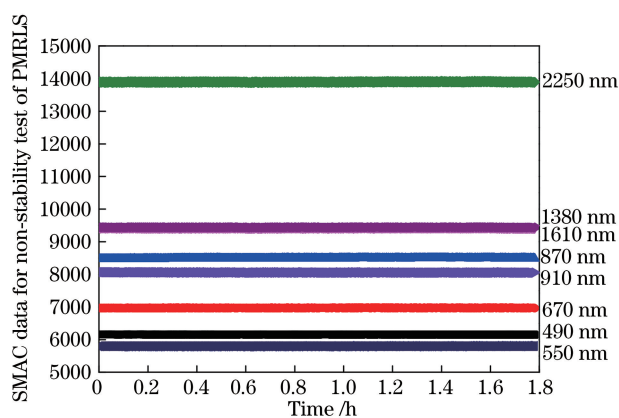


图 6 PMRLS 非稳定度测试曲线

Fig. 6 Non-stability data of RMRLS

5 结 论

研究了一种便携式多通道辐射参考光源 (PMRLS), 用于 SMAC 地面性能的快速跟踪监测, 并使用 SMAC 对光源进行了能量调试以及非稳定度、非重复度的测试。PMRLS 具有以下特点:

1) 与 SMAC 谱段、位置一一对应的发光组件集成在光源头部, 可同时检测 SMAC 所有通道的典型响应;

2) 驱动电路采用恒流输出设计, 根据波段合理选用发光体, 为降低产热量, 配合使用热沉、风冷加强散热, 其辐射能量的非稳定度小于 0.17%;

3) 发光组件产生的均匀辐射配合限位设计, 可保证测试重复度误差小于 1.3%;

4) 光源头部、控制盒采用分离式设计, 故光源头部小巧、轻便, 易于操作;

5) 光源头部与 SMAC 电子学完全隔离, 可确保测试过程安全;

6) 电池供电的方式不受场地供电资源限制, 随时可测试。

综上, PMRLS 各项技术指标均满足设计要求。阐述 SMAC 研制全过程, 比较历次试验前后对 PMRLS 的观测数据, 能够直观地展现 SMAC 各通道响应度的变化趋势, 对实时掌握遥感器当前的健康状态具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Li Z Q, Chen X F, Ma Y L, et al. An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellites [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(1): 6-15.

李正强, 陈兴峰, 马龙天, 等. 光学遥感卫星大气校正研究综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 6-15.

- [2] Qi X Y, Tian Q J. The advances in the study of atmospheric correction for optical remote sensing[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2005, 17(4): 1-6.
亓雪勇, 田庆久. 光学遥感大气校正研究进展[J]. 国土资源遥感, 2005, 17(4): 1-6.
- [3] Niu Z. Basic idea and new advance in atmospheric correction for optical remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1998, 13(1): 50-55.
牛铮. 光学遥感大气订正总体思路与最新进展[J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(1): 50-55.
- [4] Reuter D C, McCabe G H, Dimitrov R, et al. The LEISA/atmospheric corrector (LAC) on EO-1[C]//IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings of IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217), July 9-13, 2001, Sydney, NSW, Australia, Australia. New York: IEEE Press, 2001: 46-48.
- [5] Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 224: 474-511.
- [6] Hu Y D, Hu Q Y, Sun B, et al. Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 652-659.
胡亚东, 胡巧云, 孙斌, 等. 遥感图像双角度偏振大气校正仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 652-659.
- [7] Kang Q. Research on system-level radiometric and polarized calibration method in laboratory of polarization remote sensors[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
康晴. 偏振遥感器实验室系统级辐射与偏振定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [8] Qie L L, Ma Y, Chen X F, et al. Aerosol model assumption: the retrievals of aerosol optical depth from satellite near-infrared polarimetric measurements[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(5): 569-577.
伽丽丽, 马葵, 陈兴峰, 等. 卫星近红外偏振通道反演气溶胶光学厚度的气溶胶模型影响[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 569-577.
- [9] Lu E, Yan C X, Wu Q W, et al. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. Chinese Optics

- and Applied Optics, 2009(5): 364-376.
- 卢镔, 颜昌翔, 吴清文, 等. 空间光学遥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(5): 364-376.
- [10] Zhao Y H, Li Y, Jin L B, et al. High precision radiometric calibration technology for visible and infrared multispectral imager [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 106-111.
- 赵艳华, 李岩, 晋利兵, 等. 全谱段光谱成像仪高精度辐射定标技术 [J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 106-111.
- [11] Zhang Z, Li X S, Wan Z, et al. Design and measurement of radiometric performance of ultra-large aperture uniform light source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0410003.
- 张钊, 李宪圣, 万志, 等. 超大口径均匀光源辐射性能设计与测试 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0410003.