

doi:10.3788/gzxb20184706.0623002

# 连续光谱地表反射特性自动观测辐射计的光机设计

潘琰<sup>1,2</sup>, 李新<sup>2</sup>, 翟文超<sup>2</sup>, 刘恩超<sup>2</sup>, 张艳娜<sup>2</sup>, 陈媛<sup>2</sup>, 乔延利<sup>2</sup>, 郑小兵<sup>2</sup>

(1 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 合肥 230026)

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

**摘 要:**介绍了连续光谱地表反射特性自动观测辐射计(SCR)的光机系统设计. SCR 辐射计的光谱范围为 400~2 400 nm, 能够实现地表反射率的长期自动观测. 所设计的 SCR 辐射计使用经过定标的漫反射参考板作为反射率标准, 漫反射参考板通过转臂自动切入、切出测量光路. 为保证参考板在野外的长期适用性, 设计了参考板清洁机构, 对易发生失效的转臂进行静力学分析. 结果表明: 转轴位置会发生应力集中, 且距离转轴位置越远, 变形量越大, 变形引起的参考板水平误差在 0.3° 以内, 满足应用需求. 为验证 SCR 辐射计测量数据的准确性和仪器的可靠性, 设计了 SCR 辐射计和 SVC 光谱仪的比对试验. 试验结果表明: 两台仪器所测量的反射率具有相同的变化趋势, 二者偏差普遍在 ±1% 以内, 最大偏差在 ±3.5% 以内. SCR 辐射计能够实现较高精度的反射率数据自动测量, 在卫星遥感器外场自动化定标和高频次定标方面具有重要应用前景.

**关键词:**辐射计; 自动化定标; 地表反射率; 光机设计; 有限元分析

**中图分类号:** TP732

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)06-0623002-11

## Opto-mechanical Design of a Spectrally-continuous Radiometer for Surface Reflectance Automation Observation

PAN Yan<sup>1,2</sup>, LI Xin<sup>2</sup>, ZHAI Wen-chao<sup>2</sup>, LIU En-chao<sup>2</sup>, ZHANG Yan-na<sup>2</sup>, CHEN Yuan<sup>2</sup>,  
QIAO Yan-li<sup>2</sup>, ZHENG Xiao-bing

(1 School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and  
Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The opt-mechanical design of a Spectrally-Continuous Radiometer (SCR) for surface reflectance automation observation was described. Operating in 400~2 400 nm, the SCR can automatically measure the surface reflectance of radiometric calibration site to get continuous and hyperspectral reflectance data. A calibrated white diffused panel was used as the reflectance standard, and the panel was cut into and out of the optical measurement path through a rotatable mechanical arm. An air-cleaning mechanism was designed to keep the panel clean which is very important for the long-term applicability of the SCR in the field. The static analysis was carried out for the rotating arm using the static structural module of ANSYS WORKBENCH, because the rotating arm is prone to failure. The results showed that some stress concentrations located at the rotating shaft position, the deformation was larger as farther away from the rotating shaft, and the maximum deformation can caused a inclination within 0.3°. To verify the accuracy and reliability of the SCR, experiment was carried out with SCR and SVC. The results showed that the

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61505222)和国家自然科学基金青年基金(No. 41705013)资助

**第一作者:**潘琰(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为卫星遥感辐射定标技术. Email:Py2015@mail.ustc.edu.cn

**通讯作者:**李新(1975-),男,研究员,博士,主要研究方向为卫星遥感器外场辐射定标技术、自动化定标技术等. Email:xli@aiofm.ac.cn

**导 师:**乔延利(1958-),男,研究员,硕士,主要研究方向为光学遥感辐射定标、大气校正和地物波谱特性等. Email:ylqiao@aiofm.ac.cn

**收稿日期:**2018-01-02; **录用日期:**2018-03-14

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

reflectance measured with two devices had the same trend, the deviation was generally within  $\pm 1\%$ , and the maximum deviation was within  $\pm 3.5\%$ , which demonstrated that the SCR could achieve highly accurate reflectance data in automation manners and have broad application prospects in field-based automation calibration and high-frequency calibration for satellite-based remote sensors.

**Key words:** Radiometer; Automated calibration; Ground reflectance; Opto-mechanical design; Finite element analysis

**OCIS Codes:** 230.0040; 230.2090; 280.4788; 350.4600

## 0 引言

卫星载荷在轨长期运行期间受太空环境影响,其性能参数会随时间发生衰变.因此需要定期对卫星载荷进行在轨定标以校正载荷衰变.传感器辐射定标精度直接影响卫星载荷测量数据的精度<sup>[1]</sup>.对于工作在太阳反射波段(380~2 500 nm)的卫星传感器来说,目前多采用“星上定标”和外场“替代定标”的方法进行在轨定标.目前“星上定标”方法主要包括不同卫星平台的传感器交叉定标法、星上定标器定标法和月亮定标法等<sup>[2]</sup>.外场“替代定标”方法则主要采用在专用的遥感卫星辐射校正场实测地表和大气参数,利用辐射传输模型反演卫星入瞳辐亮度,进而实现卫星传感器在轨定标系数的更新或修正.

外场替代定标作为一种在地面实施的独立的定标和验证手段,能够验证并修正遥感的实验室和在轨定标结果,代表性的方法包括“反射率基法”<sup>[2-3]</sup>、“辐照度基法”<sup>[2,4]</sup>和“辐亮度基法”<sup>[2]</sup>.在这三种定标方法中,“反射率基法”应用最早,实施最方便,也更为成熟,目前仍是主流的定标手段.在业务化的辐射场定标过程中,目前仍普遍采用人工测量的方式来获取地表和大气参数.其数据的测量精度依赖于设备本身和操作人员的主观判断(如水平情况,抖动等),这导致进一步提高人工测量精度水平的潜力已非常有限.此外,定标场一般位于戈壁、沙漠等偏远地区.受限于天气、保障条件等客观因素,一次完整的定标试验需要耗费大量的人力、物力、财力和时间,这意味着人工测量的定标方法很难实现较高的定标频次,不能及时提供充足的有效样本数据,难以获得卫星传感器长时间序列上的衰变情况<sup>[1,5]</sup>.随着传感器数量、种类的增加和定标精度要求的提高,人工跑场的定标方式愈发不能满足当前的应用需求<sup>[5]</sup>.

基于人工测量定标方法的缺点,国内外开始研究自动化定标方法设备,利用无人值守的仪器长期自动观测场地反射率和大气参数.如法国国家空间技术中心在 La Crau 定标场采用 CEMEL 公司的改进型太阳辐射计建立了自动观测站.该观测站能自动观测地面反射和天空入射辐射<sup>[6]</sup>.美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制的 LSpec 光谱辐射计,其光谱范围覆盖了可见及近红外波段.该仪器布设在内华达州水星镇平坦干涸的湖床定标场地,每隔 5 分钟就能自动测量一次定标场的反射率<sup>[7]</sup>.亚利桑那大学针对 RadCaTS 定标场先后研制了基于 LED 的辐射计和基于光电二极管的对地观测辐射计(Grounding-Viewing Radiometers, GVR)<sup>[8-9]</sup>.我国国内的中科院安徽光学精密机械研究所针对敦煌卫星辐射校正场,研制了通道式自动化场地辐射计(Automated Test-site Radiometer, ATR),用于辐射校正场地表反射率特性的自动化观测<sup>[1,10]</sup>.

上述自动化观测地表反射特性的辐射计均为通道式辐射计.限于其内部滤光片的波长和数量,只能测量有限波长和有限数量的地表反射率.定标时,根据特定波长下的反射率及定标场地表反射率的长期变化趋势来反演全波段范围内的场地反射率.由于不同卫星传感器观测通道的差异,不同定标场的地面反射特性差异等因素,不同定标场通道式辐射计所配备的滤光片种类和数量的最优配置也不尽相同.目前,通道式辐射计滤光片波长和数量是根据场地反射率特性的变化趋势来选择的,但是否为最优配置尚需进一步深入探讨.

本文基于自动化定标思路和通道式辐射计的优缺点,研制了 400~2 400 nm 连续光谱范围内,可用于自动观测地表反射特性的辐射计(Spectrally-Continuous Radiometer, SCR).该辐射计采用平场凹面光栅进行分光,光谱范围覆盖了可见和短波红外波段.通过自动交替测量参考板和地面的反射辐亮度,对比得到地表反射率.同时,该仪器具备自动清洁能力,能始终保持参考板表面清洁,保证测量数据的可靠性.

## 1 测量原理

双向反射因子  $R$  定义为在相同入射和反射的几何条件下,目标的反射亮度  $L_i$  与理想朗伯参考板反射亮度  $L_{ref}$  的比值<sup>[11]</sup>.由于实际测量时,参考板不可能是理想朗伯体.经过修正后, $R$  可表示为

$$R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = R_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{L_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)} \quad (1)$$

式中,  $\theta_i$  为入射天顶角;  $\varphi_i$  为入射方位角;  $\theta_r$  为反射天顶角;  $\varphi_r$  为反射方位角;  $\lambda$  为波长;  $R_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)$  为参考板的双向反射比因子.  $R_{\text{ref}}$  数据可以溯源至国家计量院的方向反射比测量装置. 对于漫反射参考板来说, 当天顶角  $\theta_i$  和  $\theta_r$  不变时, 方位角  $\varphi_i$  和  $\varphi_r$  改变对双向反射因子  $R$  的影响几乎可以忽略. 因此, 式(1)可简化为

$$R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda) = R_{\text{ref}}(\theta_i, \theta_r, \lambda) \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; \lambda)}{L_{\text{ref}}(\theta_i, \theta_r, \lambda)} \quad (2)$$

地表反射率是地表反射光通量与总入射光通量的比值. 通过光谱仪垂直测量地表反射辐亮度  $L_{\text{ground}}$  和理想朗伯参考板的反射辐亮度  $L_{\text{white}}$ , 二值的比值经过修正之后即为地表反射率  $\rho_{\text{ground}}$ <sup>[13]</sup>. 由定义可知,  $\rho_{\text{ground}}$  为  $\theta_r=0$  的双向反射比因子  $R$ , 且考虑到观测地面反射辐亮度时反射方位角始终不变(参考测量架), 式(2)可进一步简化为

$$\rho_{\text{ground}}(\theta, \varphi, \lambda) = \rho_{\text{white}}(\theta, \lambda) \frac{L_{\text{ground}}(\theta, \varphi, \lambda)}{L_{\text{white}}(\theta, \lambda)} \quad (3)$$

式中,  $\theta$  为测量时刻的太阳天顶角,  $\varphi$  为测量时刻的太阳方位角,  $\lambda$  为测量波长.

基于上述测量原理, 所设计的 SCR 辐射计有两种工作状态:

1) 转臂转动使参考板处于水平状态. 此时, SCR 辐射计测量参考板表面垂直方向上的光谱辐亮度, 输出值记为  $\text{DN}_{\text{ground}}(\theta, \varphi, \lambda)$ ;

2) 转臂转动使参考板收回到密封箱中. 此时, SCR 辐射计测量地表垂直方向上的光谱辐亮度, 输出值记为  $\text{DN}_{\text{white}}(\theta, \lambda)$ .

将 SCR 辐射计两种工作状态下的输出值代入式(3)即得到地表的反射率. 借助地表双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)模型可以进一步对地表反射率进行全面表征, 此部分内容已经超出本论文研究范围, 在此不再赘述.

$$\rho_{\text{ground}}(\theta, \varphi, \lambda) = \rho_{\text{white}}(\theta, \lambda) \frac{L_{\text{ground}}(\theta, \varphi, \lambda)}{L_{\text{white}}(\theta, \lambda)} = \rho_{\text{white}}(\theta, \lambda) \frac{\text{DN}_{\text{ground}}(\theta, \varphi, \lambda)}{\text{DN}_{\text{white}}(\theta, \lambda)} \quad (4)$$

## 2 SCR 辐射计设计

### 2.1 SCR 辐射计总体设计

SCR 辐射计通过测量地面反射辐亮度  $L_{\text{ground}}$  和参考板的反射辐亮度  $L_{\text{white}}$ , 二者之比经过修正后即为地面反射率. SCR 辐射计的主要技术指标如表 1 所示. SCR 辐射计主要由控制箱, 前置观测镜头, 导光光纤和测量架组成, 见图 1. 控制箱主要由主机单元、野外防护箱、运动控制单元和 4G 模块等组成, 如图 2. 其中, 主机单元固定在野外防护箱内部, 是 SCR 辐射计的核心, 由分光单元模块和相关控制电路组成, 主要完成入射光的光谱细分和采集. 野外防护箱主要是为内部元件提供初步保护, 避免内部元件受太阳直射、风沙和雨水等

表 1 SCR 辐射计主要性能参数  
Table 1 The main parameters of SCR

Spectral response range	400~2 400 nm
Linear image sensors	1) N-channel Metal Oxide Semiconductor (NMOS) linear image sensor with 512 pixels (400~1 000 nm) 2) InGaAs linear image sensors with 256 pixels (1 000~1 800 nm) 3) Applications InGaAs linear image sensors with 256 pixels (1 800~2 400 nm)
Full Width at Half Maximum (FWHM)	$\leq 4$ nm @ (400~1 000 nm); $\leq 15$ nm @ (1 000~1 800 nm); $\leq 20$ nm @ (1 800~2 400 nm)
Sampling bandwidth	1.1~1.3 nm @ (400~1 000 nm); 3.1~3.6 nm @ (1 000~1 800 nm); 3.3~3.9 nm @ (1 800~2 400 nm)
Field of View (FOV)	10° lens or 25° fiber (can custom-made othes FOV)
Temperature of environment	-40~60°C

直接侵蚀,同时保证主机单元的正常散热.运动控制单元主要是控制转臂的运动,从而实现漫反射参考板切入、切出光路.4G 模块主要是实现数据的无线远程传输.

前置光学镜头用于限制 SCR 辐射计的视场,导光光纤用于连接前置光学镜头与主机单元内的分光模块.通过前置光学镜头和导光光纤保证光纤端面照明的均匀性和分光模块观测视场的一致性.

测量架是 SCR 辐射计的支撑结构,整体为“L”形,主要起固定和支撑作用.测量架上配置一运动转

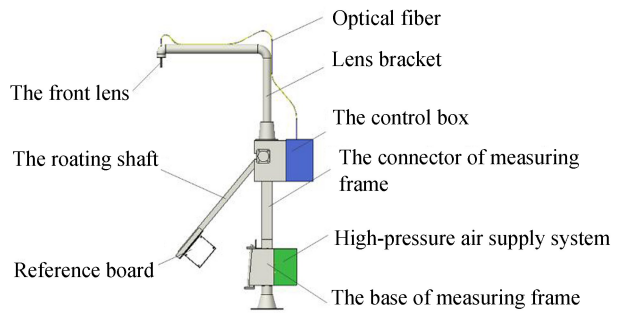


图 1 SCR 辐射计整体图

Fig.1 The overall picture of SCR radiometer

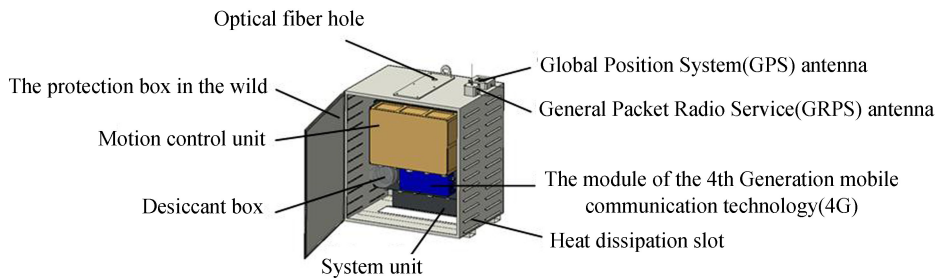


图 2 SCR 辐射计控制箱

Fig.2 The control box of SCRradiometer

臂,转臂上安装有参考板.通过转臂运动来实现测量光路中参考板的切入/切出,从而完成地表反射率的比对测量.

使用 SCR 辐射计时,首先将测量架固定在地面,然后将控制箱、前置光学镜头和光纤等固定在测量架上.安装过程中需特别注意,不能破坏前置光学镜头下方的地面反射特性.通过电脑手动或自动控制 SCR 辐射计进行信号采集和处理.

## 2.2 SCR 辐射计的光机系统设计

SCR 辐射计的光机系统设计主要包括分光单元模块设计、前置光学镜头设计、测量架的结构设计、参考板自清洁设计和基于静力学分析的转臂设计.

### 2.2.1 分光单元模块设计

SCR 辐射计的设计光谱范围为  $400 \sim 2400 \text{ nm}$ ,光谱范围较宽.考虑到单个探测器响应波段范围的限制,设计了三个独立的分光单元模块,分别为覆盖  $400 \sim 1000 \text{ nm}$  的可见~近红外模块 (Visible-Infrared Spectrum Module, VIS),覆盖  $1000 \sim 1800 \text{ nm}$  的短波红外模块 1(the first module of Shortwave Infrared, SWIR1)和覆盖  $1800 \sim 2400 \text{ nm}$  的短波红外模块 2(the Second Module of Shortwave Infrared, SWIR2).

SCR 辐射计分光单元采用平场凹面光栅作为分光 and 成像元件.平场凹面光栅集分光、成像和像差校正功能于一体,并将入射狭缝的光谱图像会聚到一个平面上<sup>[14]</sup>.使用平场凹面光栅的设计方式,可有效减少分光

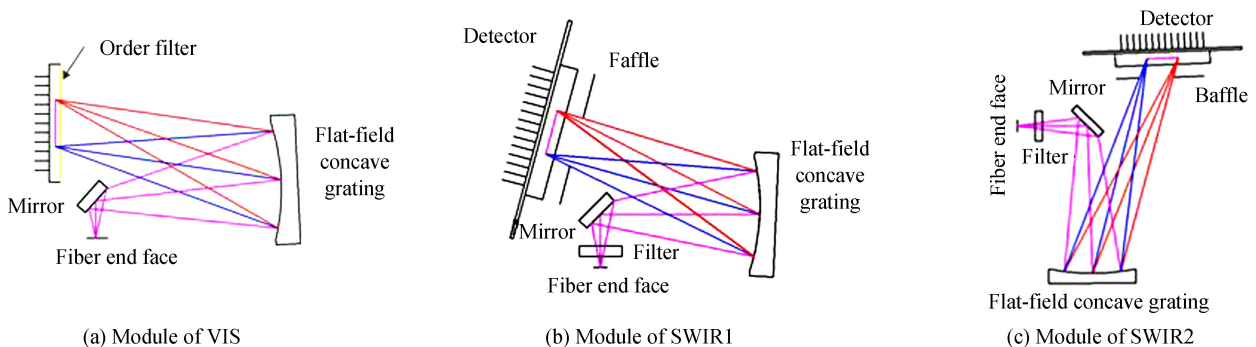


图 3 分光单元模块光路原理

Fig.3 The optical principle of the dispersed module

单元内部光学元件的数量,更适合野外自动化运行设备性能的长期保持.所设计分光单元模块的光路原理图如图 3.

为适应长期野外工作的环境,分光单元模块采用了全密封的设计,见图 4.在壳体表面与外界联通的地方安装密封元件.对于 SWIR1 和 SWIR2 模块,两模块覆盖波段范围为 1 000~2 400 nm,属于短波红外范围.所使用 InGaAs 阵列探测器对温度变化比较敏感.为保证探测器始终处于制冷温度,分别设计了制冷电路,使辐射计能够在-40℃~60℃的温度范围内正常工作.在探测器和壳体之间加帕尔帖进行制冷,壳体上设计散热翅片并配合风扇主动风冷解决密封壳体中探测器制冷电路的有效热传导.

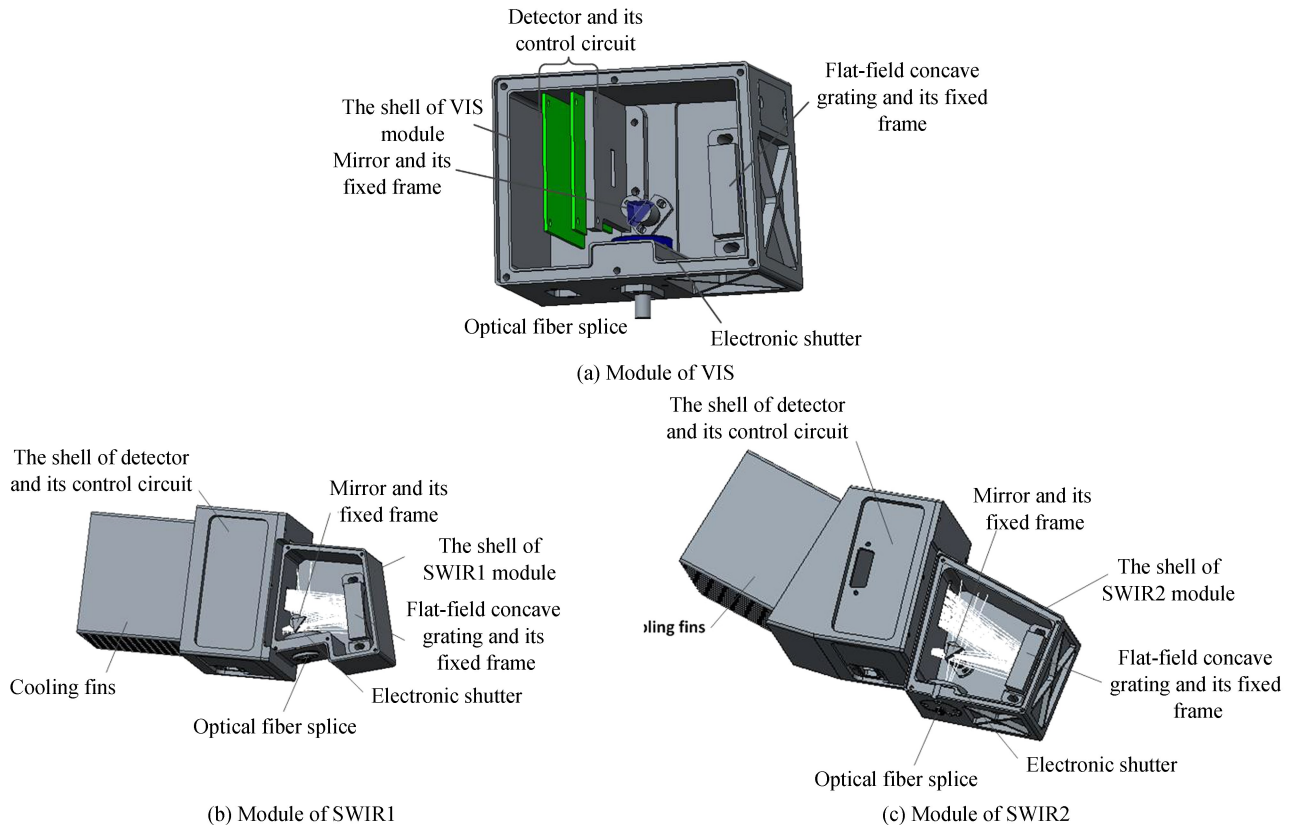


图 4 分光单元模块整体示意图

Fig.4 The whole schematic of internal beam splitter module

### 2.2.2 前置光学镜头设计

前置光学镜头的目的是限制辐射计的视场范围,以使三个分光单元模块的视场一致.基于上述设计要求,前置光学镜头使用柯勒照明式设计,这种结构能够产生均匀明亮,无眩光的照明.前置光学镜头设计光路如图 5.

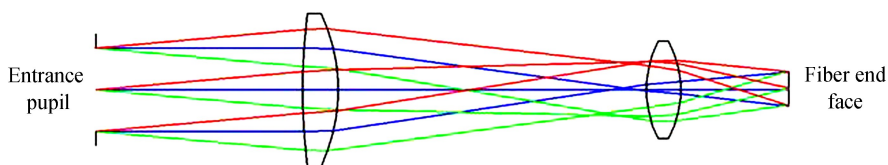


图 5 前置光学镜头光路

Fig.5 Optical path of front optical lens

根据图 5 设计前置光学镜头的机械结构.前置光学镜头采用实光瞳外置的设计方式,光学透镜位于镜头主体内部,与光阑有一定的距离,形成陷阱结构,防止风沙对光学镜头的污染.拆下前置光阑后,可对光学透镜进行清洁.如图 6 所示,所设计的 SCR 辐射计前置光学镜头视场角  $\beta$  为  $10^\circ$ .根据使用需求,可设计不同视场的镜头.

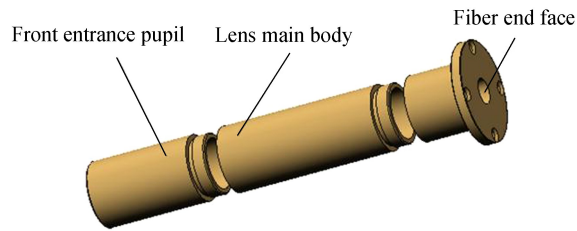


图6 前置光学镜头三维图  
Fig.6 3D map of front optical lens

### 2.2.3 测量架设计

测量架主要是起支撑和固定作用.根据固定元件的不同,可将测量架分成镜头支架,转臂,测量架底座和测量架转接件四个部分.

镜头支架主要是固定测量镜头,使其能垂直、稳定的测量反射亮度.为避免安装过程中破坏待测地面的地表特性,设计镜头支架呈“L”型.设计镜头支架的横向尺寸为1200 mm,镜头支架距离参考板的距离约1000 mm.

测量架底座和测量架连接件通过螺栓连接成为一个整体,称为测量架主体,主要是起固定和保护作用.设计测量架底座为一中空的箱体.当SCR辐射计测量地表反射辐亮度时,转臂转动将参考板密封在密封箱内进行保护.为节省空间,设计参考板切入/切除密封箱时转臂的旋转角度为 $79.5^\circ$ ,参考板可借助重力密封在密封箱内.根据镜头支架的横向尺寸和转臂的旋转角度,可以确定测量架主体的高度尺寸,如图7所示.测量架主体的高度最小为1357 mm.预留部分余量,设计测量架主体的总高为1890 mm.所设计SCR辐射计工作状态如图8.

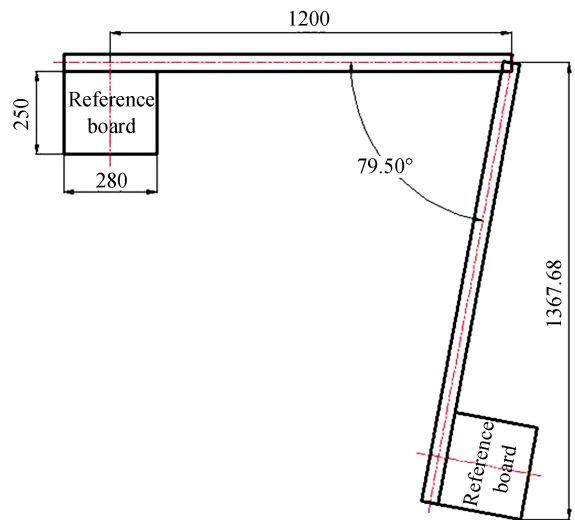


图7 测量架主体尺寸  
Fig.7 Dimensions of the measuring frame's main body

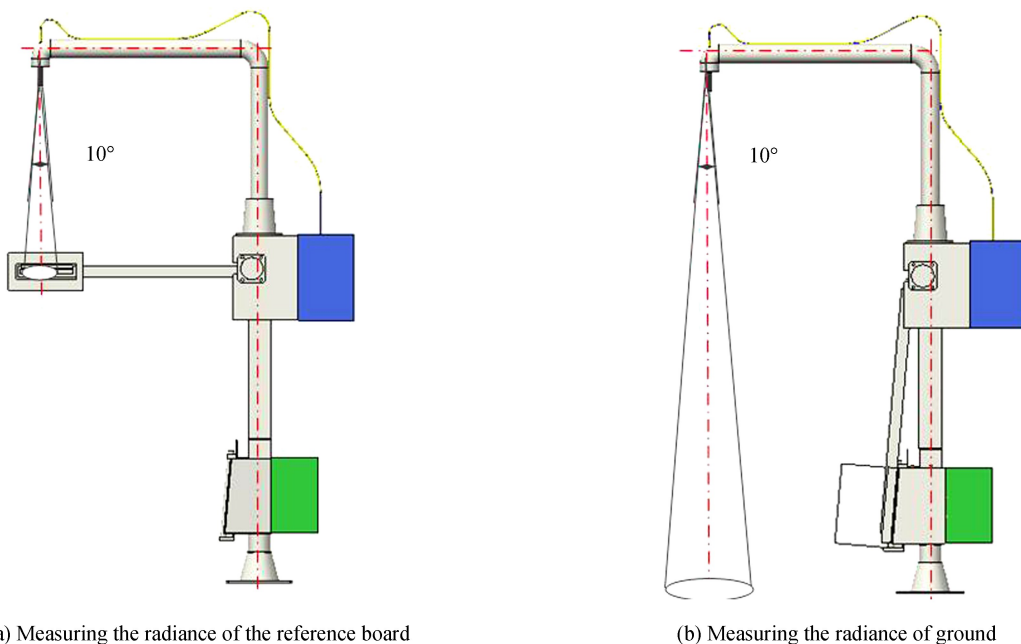


图8 测量架工作状态  
Fig.8 Operational modes of the measurement frame

### 2.2.4 参考板自清洁设计

SCR 辐射计的工作环境是在野外,因此,环境中的风沙、粉尘等可能会粘附在参考板表面,从而改变参考板表面的光学特性,引入测量误差.为减小这一影响,采用清洁的高压空气对参考板表面进行清洁.

使用清洁的高压空气作为气源,在密封箱的顶部和背部布设一定数量的气管.在参考板切入/切出密封箱的过程中,高压空气持续吹向参考板表面,使参考板表面保持清洁.由上节可知,前置镜头在参考板表面的观测区域直径约 175 mm.为保证参考板表面观测区域的清洁,设计高压空气覆盖参考板中心直径 200 mm 的范围.图 9 为参考板自清洁示意图.转臂转动 62.36°后,背部气管工作.转动过程中,能够覆盖图中的黄色区域.转臂转动 67.46°后,顶部气管开始工作.转动过程中,能够覆盖图中的蓝色区域.由图 9 可知,高压空气覆盖区域大于设计范围,满足自清洁要求.

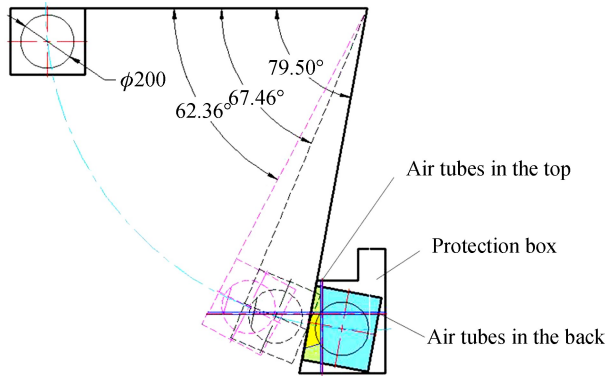


图 9 参考板自清洁示意图

Fig.9 Schematic of reference board self-cleaning

### 2.2.5 转臂静力学分析

转臂的转动可分为两种:1)转臂绕  $y$  轴转动,实现参考板竖直状态与水平状态的切换;2)转臂绕  $z$  轴转动,实现参考板切入或切出密封箱.在转动过程中,转臂类似于悬臂梁,容易出现断裂,弯曲等失效形式.为进一步了解转臂转动过程中的应力和变形情况,使用 ANSYS Workbench 软件对转臂进行静力学分析<sup>[15-16]</sup>.转臂材料设置为铝合金,分析结果如图 10 和图 11.

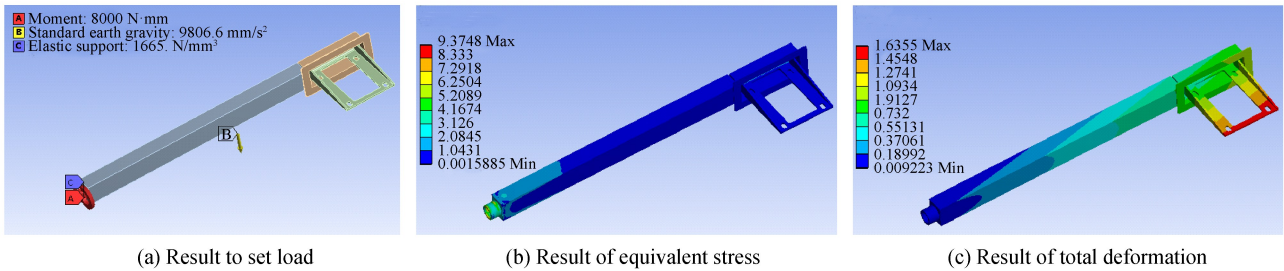


图 10 转臂绕  $y$  轴转动时的静力学分析结果

Fig.10 Static analysis results when the arm rotates around the  $y$  axis

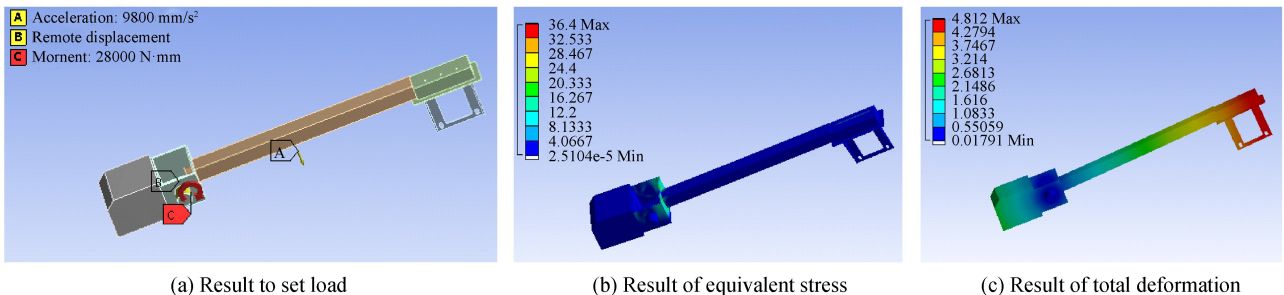


图 11 转臂绕  $z$  轴转动时的静力学分析结果

Fig.11 Static analysis results when the arm rotates around the  $z$  axis

由图 10 可知,转臂绕  $y$  轴转动时,在转轴位置出现应力集中,最大应力约 9.3748 MPa;最大变形出现在参考板托架上,距离转臂中心线越远,托架变形越大,最大变形为 1.6355 mm.

由图 11 可知,转臂绕  $z$  轴转动时,在转轴位置出现应力集中,最大应力约 36.6 MPa;且距离转轴越远,转臂的变形越大,最大变形约 4.812 mm.

根据参考板特性可知,在野外测量时,应尽可能使用  $0^\circ$  观测.基于图 10(b),假设参考板边缘最大变形为 1.635 5 mm 已知参考板边缘距离转臂中心约 350mm,则参考板与水平面的夹角为  $\alpha = \arctan(1.6355/350) \approx 0.267 7^\circ$ .基于图 11(b),假设参考板中心位置的最大变形为 4.812 mm.已知转轴距离参考板中心位置约 1 418 mm,则转臂与水平面的夹角为  $\alpha' = \arctan(4.812/1 418) \approx 0.194 4^\circ$ .两个角度误差体现在参考板方向反射比因子的差异,可以忽略.

### 3 SCR 辐射计的野外实验及结果分析

#### 3.1 SCR 辐射计与 SVC 光谱仪比对实验

2017 年 4 月 28 日,5 月 11-13,24-26 日,7 月 24-25 日在安徽光学精密机械研究所进行 SCR 辐射计和美国 Spectra Vista 公司生产的 SVC HR-1024I 光谱仪的对比实验,测量目标为灰色靶标.2017 年 9 月 27-28 日在敦煌辐射校正场进行 SCR 辐射计和 SVC HR-1024I 光谱仪的对比实验,测量目标为敦煌场.对比 SCR 辐射计测得反射率  $\rho_1$  和 SVCHR-1024I 光谱仪测得反射率  $\rho_2$ ,并计算二者的偏差 ( $\text{diff}\% = (\rho_1 - \rho_2) \cdot 100\%$ ).

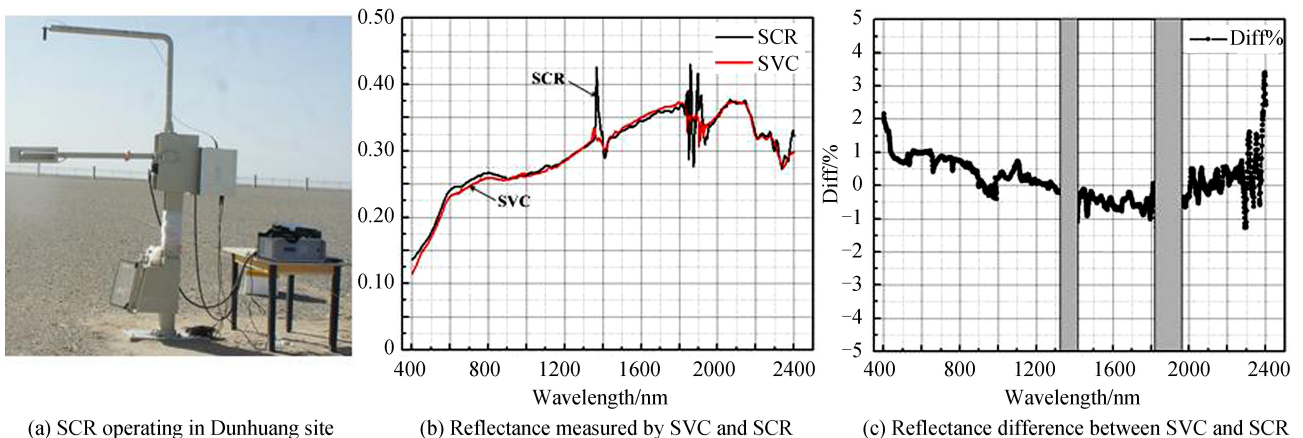


图 12 敦煌校正场 SVC 与 SCR 对比实验(2017.09.28 14 : 24-14 : 6)

Fig.12 Comparison experiment of SVC and SCR in DunHuang site(2017.09.28 14 : 24-14 : 26)

如图 12(b)和 12(c)所示,分别为两台仪器测得的敦煌场地的反射率及二者的偏差,测量时间为 9 月 28 日 14 : 24~14 : 26.由于 1 400 nm 和 1 900 nm 处于大气的吸收带,仪器在这些波段测得的数据不具备可靠性,因此不予考虑<sup>[17]</sup>.如图所示,在全波段范围内, $\rho_1$ 和  $\rho_2$ 的趋势相同.去除掉大气吸收带附近波段后,二者偏差普遍在  $\pm 1\%$ ,以内最大偏差在  $\pm 3.5\%$ 以内.其中,在 400~420 nm 最大偏差小于  $\pm 2.2\%$ ,2 300 nm 以后最大偏差小于  $\pm 3.5\%$ .因此,可认为 SCR 辐射计所测量数据具有较高的精度.

#### 3.2 测量结果分析

推测产生偏差的主要原因有以下几个方面:1) SVC HR-1024I 光谱仪由人工操作,其数据测量精度依赖于人的操作水平;2)测量目标不均匀;3)仪器视场的差异.其中,由前两个原因所引起的偏差与仪器自身无关,不在本文的研究范围内.因此,本文仅就视场引起的偏差进行详细描述.

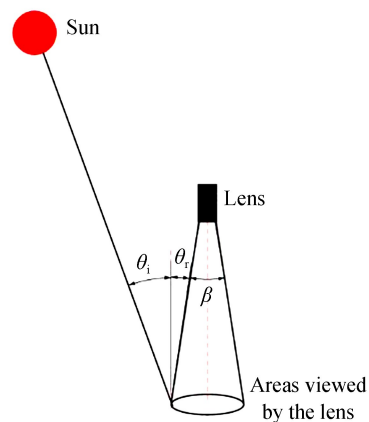


图 13 测量几何示意图

Fig.13 Schematic diagram of measurement geometry



在上述比对试验中,SCR 辐射计镜头的全视场为  $\beta=10^\circ$ ,SVC HR-1024I 光谱仪镜头的全视场为  $\beta=4^\circ$ . 测量过程中,近似认为地表反射的光通量垂直进入镜头,即反射天顶角  $\theta_r=0^\circ$ .实际上,除镜头下方的小部分区域外,反射天顶角  $\theta_r \neq 0^\circ$ ,如图 13 所示.对于 SCR 辐射计而言,观测区域的反射天顶角最大为  $\pm 5^\circ$ ,SVC 光谱仪观测区域的反射天顶角最大为  $\pm 2^\circ$ .测量过程中,由于时间间隔较短(小于 2 分钟),近似认为太阳天顶角不变,SCR 辐射计和 SVC 光谱仪可近似为同步观测.根据数据记录,计算得到测量时刻的太阳天顶角,结果为  $\theta_i \approx 44^\circ$ .

根据安徽光学精密机械研究所 2017 年 4 月在敦煌校正场的 BRDF 实测数据,分别计算出  $\theta_i=44^\circ, \theta_r=0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 2^\circ$  时太阳主方位面上的敦煌校正场的反射率,并计算  $\theta_r \neq 0^\circ$  相较于  $\theta_r=0^\circ$  时的偏差( $\text{diff}\% = (\rho_{\theta_r \neq 0} - \rho_{\theta_r=0}) \cdot 100\%$ ),如图 14 和图 15 所示.由图可知, $\theta_r = \pm 5^\circ$  和  $\theta_r = \pm 2^\circ$  时的反射率均关于  $\theta_r=0^\circ$  基本对称, $\theta_r = \pm 5^\circ$  和  $\theta_r = \pm 2^\circ$  关于  $\theta_r=0^\circ$  的反射率最大偏差如表 2 所示.由图表可知,当其他条件不变时,偏差随视场的增大而增大.表 2 中所列出的反射率最大偏差实际上代表了视场边缘的极端情况,在全视场观测条件下,实际结果将小于利用边缘视场计算得到的偏差.

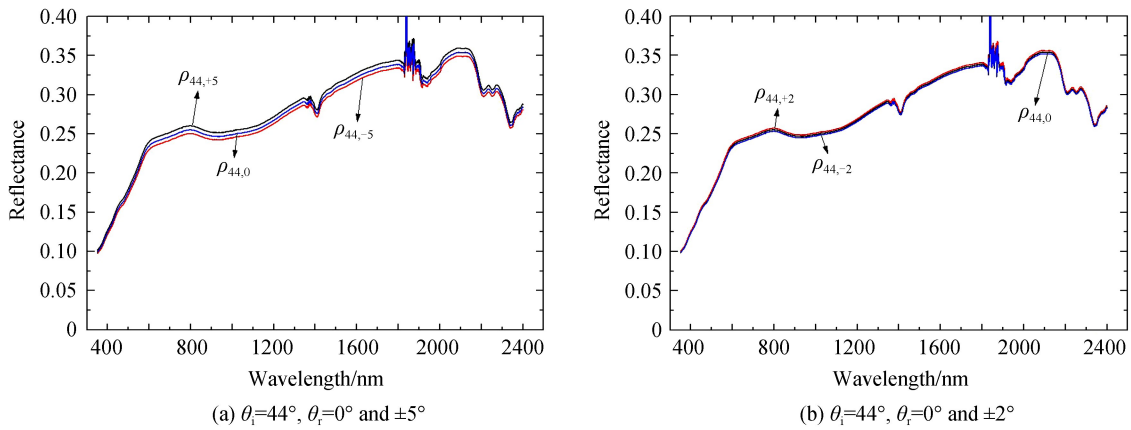


图 14 敦煌辐射校正场在不同天顶角下的反射率

Fig.14 Reflectance of Dunhuang site in different zenith angles

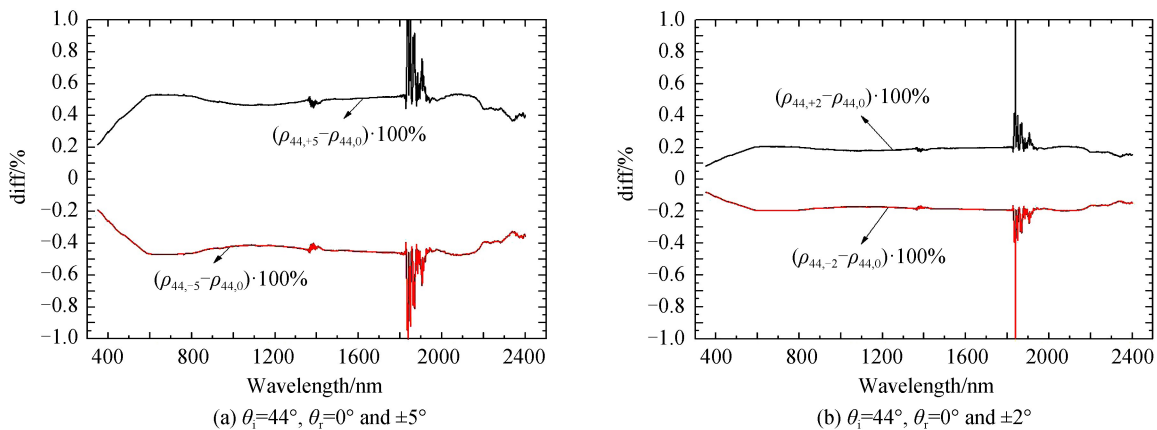


图 15 入射天顶角相同,反射天顶角不同时敦煌辐射校正场反射率间的误差

Fig.15 Difference of reflectance in the same incident zenith angles and different reflected zenith angles at Dunhuang site

表 2  $\theta_r \neq 0^\circ$  相较于  $\theta_r=0^\circ$  时的最大偏差  
Table 2 Maxim difference of between  $\theta_r \neq 0^\circ$  and  $\theta_r=0^\circ$

Zenith angles	Maxuim difference
$\theta_i=44^\circ, \theta_r=+5^\circ$	0.536%
$\theta_i=44^\circ, \theta_r=-5^\circ$	-0.476%
$\theta_i=44^\circ, \theta_r=+2^\circ$	0.207%
$\theta_i=44^\circ, \theta_r=-2^\circ$	-0.196%

## 4 结论

介绍了连续光谱地表反射特性自动观测辐射计(SCR)的光机系统设计. SCR辐射计采用平场凹面光栅作为分光元件, 光纤作为导光元件, 线阵列探测器作为响应元件. SCR辐射计通过交替测量地表和参考板反射亮度来获得地表反射率. 为保证参考板表面洁净, 设计SCR辐射计具有自清洁能力. 2017年4月~11月SCR辐射计始终放置在室外, 期间经历了风沙, 雨水等多种天气条件. SCR辐射计始终处于正常状态. 因此, SCR辐射计具有较高的环境适应性. 将SCR辐射计与SVC光谱仪进行比对实验. 实验结果表明, 二者所测反射率整体趋势相同, 且二者的偏差普遍在 $\pm 1\%$ 以内, 最大偏差小于 $\pm 3.5\%$ . 因此, SCR辐射计所测数据具有较高的精度, 能够替代人工测量反射率, 实现较高的测量频次.

### 参考文献

- [1] YIN Ya-peng, LI Xin, ZHENG Xiao-bing, *et al.* Design and implemeng of automated site observing radiometer[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, **11**(1): 44-50.  
尹亚鹏, 李新, 郑小兵等. 场地自动化观测辐射计的设计与实现[J]. 大气与环境光学学报, 2016, **11**(1):44-50.
- [2] GAO Hai-liang, GU Xing-fa, YU Tao, *et al.* The research overview on visible and near infrared channels radiometric calibration of space-borne optical remote sensors[J]. *Remote Sensing Information*, 2010, **4**: 117-128.  
高海亮, 顾行发, 余涛等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展[J]. 遥感信息, 2010, **4**:117-128.
- [3] DONG Yi, LV Jia-yan, SONG Qing-tao, *et al.* Reflectance radiation calibration principle and process introduction[J]. *Innovation and Application of Science and Technology*, 2016, **24**: 71-72.  
董毅, 吕佳彦, 宋青涛等. 反射率基法辐射定标原理和流程介绍[J]. 科技创新与应用, 2016, **24**: 71-72.
- [4] HU Xiu-qing, ZHANG Xiu-xiang, QIU Kang-mu. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method[J]. *Journal of Remote sensing*, 2003, **7**(6): 458-464.  
胡秀清, 张秀香, 邱康睦. 采用辐照度基法对FY-1C气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标[J]. 遥感学报, 2003, **7**(6): 458-464.
- [5] LI Xin, ZHENG Xiao-bing, YIN Ya-peng. Progress in automated site vicarious calibration technologies[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, **9**(1): 17-21.  
李新, 郑小兵, 尹亚鹏. 场地自动化定标技术进展[J]. 大气与环境光学学报, 2014, **9**(1):17-21.
- [6] SCHMECHTIG C, SANTER R P, ROGER J-C, *et al.* Automatic ground-based station for vicarious calibration[C]. SPIE, 1997, **3221**: 309-317.
- [7] KEROLA D X, BRUEGGE C J, GROSS H N, *et al.* On-orbit calibration of the EO-1 Hyperion and advanced land imager (ALI) sensors using the LED spectrometer (LSpec) automated facility[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(4): 1244-1255.
- [8] CZAPLA-MYERS J S, THOME K J, LESSO N P. Radiometric calibration of earth-observing sensors using an automated test site at Railroad Valley Nevada[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, **36**(5): 474-487.
- [9] CZAPLA-MYERS J S. Automated ground-based methodology in support of vicarious calibration[D]. Tucson: The University of Arizona, 2006:41-43,54-57.
- [10] QIU Gang-gang, LI Xin, WEI Wei, *et al.* Experiment and analysis of on-orbit radiometric calibration for remote sensors based on in-site automated observation technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(7): 0701001.  
邱刚刚, 李新, 韦玮等. 基于场地自动化观测技术的遥感器在轨辐射定标实验与分析[J]. 光学学报, 2016, **36**(7): 0701001.
- [11] LI Xin, ZHENG Xiao-bing, XUN Li-na, *et al.* Design of automated field hyperspectral BRDF measurement system[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(2): 262-268.  
李新, 郑小兵, 寻丽娜等. 室外高光谱BRDF自动测量系统的设计[J]. 光学技术, 2008, **34**(2):262-268.
- [12] SANDMEIER S T, MULLER C H, HOSGOOD B, *et al.* Sensitivity analysis and quality assessment of laboratory BRDF data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **64**: 176-191.
- [13] DUGGIN M J, CUNIA T. Ground reflectance measurement techniques: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1983, **22** (23): 3771-3777.
- [14] LI Xin, ZHENG Xiao-bing, HONG Jin, *et al.* Optical and mechanical design of SWIR hyperspectral field spectroradiometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1656-1661.

李新,郑小兵,洪津,等. 高光谱短波红外地物光谱仪光机设计[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(11):1656-1661.

[15] 张岩. ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2014:133-149.

[16] TANG Chuan-jun, ZHANG Jian, LI Jian, *et al.* Fatigue analysis of transmission gear shaft based on workbench[J]. *Automobile Applied Technology*, 2014, **2**: 1-4.

汤传军,张键,李健等. 基于 Workbench 变速器齿轮轴的疲劳分析[J]. 汽车实用技术, 2014, **2**: 1-4.

[17] LI Li, QIAO Yan-li, GU Xing-fa, *et al.* A laboratory verification method of wide field vision effect based on miniature model[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, **28**(2):70-75, 81.

李丽,乔延利,顾行发,等. 基于缩微模型法的宽视场效应实验室验证方法的研究[J]. 遥感信息, 2013, **28**(2): 70-75, 81.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61505222) and the National Natural Science Foundation Youth Project(No. 41705013)

引用格式: PAN Yan, LI Xin, ZHAI Wen-chao, *et al.* Opto-mechanical Design of a Spectrally-continuous Radiometer for Surface Reflectance Automation Observation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0623002

潘琰,李新,翟文超,等.连续光谱地表反射特性自动观测辐射计的光机设计[J].光子学报,2018,**47**(6):0623002