

文章编号: 0253-2239(2009)12-3545-06

# 可见—短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计

杨本永<sup>1,2</sup> 张黎明<sup>1,2</sup> 陈洪耀<sup>1,2</sup> 乔延利<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031  
<sup>2</sup> 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** 星上定标系统是有效监测遥感器辐射响应性能的重要技术构成, 高光谱技术和信息应用的发展对星上定标系统提出了更高的要求, 包括太阳光谱的一致性、系统小型轻量化与稳定性等技术难题。提出一种较完整的技术方案, 以内置卤钨灯为光源, 用小型化的积分球为匀光体, 采用色温校正技术调节其光谱输出, 内置安装标准辐射计监视系统的稳定性。系统设计结合航天环境要求, 获得了积分球辐亮度输出在太阳反射波段达到 0.9 倍的大气外太阳照射朗伯面的水平、出口面非均匀性为 0.6%、在出射角 $\pm 15^\circ$ 内辐亮度变化小于 1.5%等满足一定工程应用要求的实验结果, 系统重量、体积分别小于 1.2 kg, 0.002 m<sup>3</sup>, 开机稳定时间小于 5 min, 辐射输出在约 200 h 内保持良好的稳定性。

**关键词** 遥感; 可见至短波红外波段; 高光谱; 星上定标积分球; 色温校正

**中图分类号** TP394.1; TH691.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3545

## System Design of the Integrating Sphere Used for on-Board Calibration of Visible-SWIR Hyperspectral Remote Sensors

Yang Benyong<sup>1,2</sup> Zhang Liming<sup>1,2</sup> Chen Hongyao<sup>1,2</sup> Qiao Yanli<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** On-board calibration system is an important technical component for effectively monitoring the performance of radiometric response of remote sensors, the development of hyperspectral technique and information application require more advanced on-board calibration system and more high performance index, which include challenging problems such as nonconforming to spectral distribution of solar, compact system structure and stability. This research promoted a rather full art scheme aiming at above problems, which included tow internal lamps taken as the light source, a minitype integrating sphere used as uniform body, a color temperature correction technique applied for improving the spectral distribution and a standard radiometer fixed interiorly for monitoring the stability of the system. Combining the spaceflight environment request, system design was performed and some experiment results suitable for definite engineering application were obtained. The output spectral radiance in visible-SWIR achieves 0.9 times of the radiance of exoatmosphere solar illuminating lambertian surface. The surface ununiformity is within 0.6% and the difference of radiance within  $\pm 15^\circ$  is 1.5%, and the system weight and volume are less than 1.2 kg, 0.002 m<sup>3</sup> respectively. The bootstrap stabilizing time is 5 min and the radiation output within about 200 h keeps good stability.

**Key words** remote sensing; visible-SWIR; hyperspectrum; integrating sphere used for on-board calibration; color temperature correction

收稿日期: 2009-04-22; 收到修改稿日期: 2009-06-10

作者简介: 杨本永(1976—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事辐射定标与标准传递技术、遥感定量化等方面研究。

E-mail: byyang@aiofm.ac.cn

导师简介: 张黎明(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事卫星传感器辐射定标与在轨表征技术、漫反射等方面研究。E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

对地面目标进行“由表及里”的广泛观测,需要在空间平台上开展地表物质成份与其反射光谱的对应研究。从 20 世纪 80 年代以来,不同类型的高光谱成像仪不断问世<sup>[1~5]</sup>,其通过提取观测像元的连续光谱揭示地物的成份及其变化信息,在矿物探测、精准农业<sup>[6]</sup>、火灾预警以及目标识别等方面具有很大的应用潜力<sup>[7]</sup>,高光谱遥感已经成为遥感领域的热点<sup>[8]</sup>。

然而,高光谱遥感定量化水平是制约其应用潜力的瓶颈,辐射定标是定量遥感的关键过程。遥感器发射前在实验室要进行全面的定标检测,但是其在航天发射和空间运行环境下辐射响应变化是不可避免的,设置星上定标系统实时监测其变化是一个有效的技术途径。以可见至短波红外波段的高光谱遥感器为例,星上定标系统的设计面临如下难题:一方面,星上定标光源要在体积小、重量轻、功耗低的前提下,具备高精度的标准参照特性来满足确定光谱范围的相对与绝对辐射定标需求;另一方面,高光谱成像的特点要求定标光源有合适的光谱分布,即在整个太阳反射波段有高光谱的、适应于各波段动态范围的能量输出,使其在上百个连续波段上都有较高的定标精度;另外,星上定标光源要性能稳定、工作可靠。

全口径全光路的太阳-漫射板系统被认为是目前较为理想的星上定标系统<sup>[9]</sup>,但是目前在国内实现难度较大,一些关键技术有待突破;而且在体积、重量以及稳定性方面有待研究。基于标准灯的星上定标系统因其结构紧凑、稳定性好、简便易行成为常用的星上内定标器(IC)。但是,定标灯和太阳色温分别为 3000 K 和 6000 K,二者光谱分布是不匹配的;同时,积分球出射面的面均匀性和朗伯性是通过对照的空间积分来实现的,这些特点对高光谱遥感器的连续谱段定标和小型轻量化要求提出了挑战。为了适应我国高光谱遥感器平台升级的需要,本文研究了高光谱遥感器星上定标积分球系统,进行了总体方案、光电系统设计,并通过光学特性检测进行了设计验证。

## 2 系统概述

高光谱成像仪以积分球为标准光源并通过其投影系统将光辐射引进光路并照射焦平面器件,从而

建立辐射响应与标准辐射量值之间的对应关系,实现其辐射定标(如图 1 所示)。

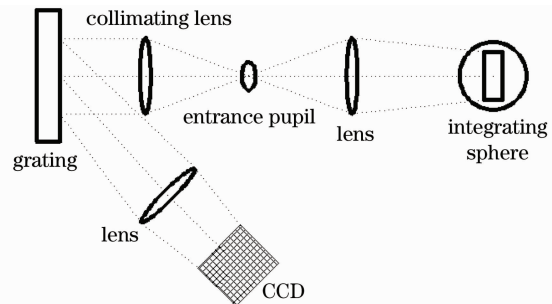


图 1 基于积分球的高光谱遥感器星上定标系统示意图

Fig. 1 Principle of on-board calibration system based integrating sphere for hyperspectral remote sensors

设计积分球系统以小型化的聚四氟乙烯积分球为匀光体,采用内置卤钨灯的方式引入光源,经色温校正后,在积分球内多次反射匀光,形成近似朗伯面光源。积分球结构体上安装陷阱探测器进行稳定性监测;两只卤钨灯独立工作,相互备份,并可实现能级调节;电源及控制电路与积分球分体放置,互不干扰;星上定标积分球系统工作原理如图 2 所示。

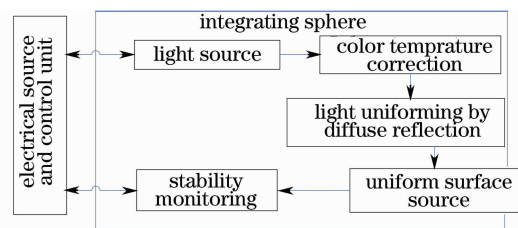


图 2 星上定标积分球系统基本构成图

Fig. 2 Sketch of integrating sphere system composing for on-board calibration

## 3 光电设计

### 3.1 辐射源

石英卤钨灯因其结构轻便、输出稳定、光学复现能力强被普遍用于辐射标准传递,同时也适于航天应用。本积分球系统选用两只 10 W 石英卤钨灯作为电光源,该卤钨灯具有长期重复稳定性,并且经过航天级批次鉴定和筛选。卤钨灯以恒流驱动提高其工作稳定性,采用慢开慢闭控制方式消除开关对灯造成的冲击,通过对卤钨灯降额使用延长使用寿命,同时主备光源性能一致、独立控制,可备份工作。卤钨灯光谱辐射通量  $\phi(\lambda)$  ( $\text{W} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ) 可近似表达为<sup>[10]</sup>

$$\phi(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \frac{\rho}{\sigma T^4}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ );  $c_1 = 3.7413 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \mu\text{m}$ ;

$c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ;  $T$  为灯丝温度 (K);  $\varphi$  为光源电功率 (W);  $\sigma = 5.6686 \times 10^{-20} \text{W} \cdot \mu\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。  
(1) 式忽略了钨丝发射率随其温度和波长的变化; 同时, 钨在  $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$  光谱发射率约为  $0.7 \sim 0.8$ , 卤钨灯并不能完全将电功率转化为光辐射, 但是积分球可以将其光辐射较完全地收集。因此, 基于卤钨灯的积分球系统具有较高的光转化效率。

### 3.2 积分球

积分球为电光源辐射输出的匀光器, 从卤钨灯发出的光经漫反射球面多次反射匀光, 在积分球出口形成具有良好面均匀性和近似朗伯性的面光源, 积分球出射均匀性决定着星上定标、特别是相对定标的精度。因此, 积分球设计的一个重要问题, 就是针对积分球星上定标应用和小型轻量化要求, 优化涂层、内径、开口、光源位置等球体参数获取优良的输出均匀性。

积分球系统出口的辐射亮度是由内置卤钨灯的光辐射经过色温校正器光谱调制和内壁涂层的亮度积分的一个综合效应。根据积分球原理<sup>[10]</sup>, 积分球系统的光谱辐亮度  $L(\lambda)$  由卤钨灯的光谱辐射通量  $\phi(\lambda)$ 、内壁涂层反射率  $\rho(\lambda)$ 、光谱调制系数  $T(\lambda)$ 、积分球内表面积  $A$  以及开口比  $f$  确定,

$$L(\lambda) = \frac{\phi(\lambda)}{\pi A} \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)(1 - f)} T(\lambda), \quad (2)$$

式中  $f = \frac{a}{A}$ ,  $a$  为积分球开口面积之和。

积分球内壁涂层的反射率和朗伯性是影响积分球辐射积分和匀光效果的重要光学参数, 同时高光谱遥感器的特点决定了其星上定标积分球系统功耗低、工作谱段宽, 这就要求积分球涂层在整个太阳反射波段具有良好的反射特性。国际上选用的同类涂层在红外区反射率较低且容易衰变, 本积分球系统选用中国科学院安徽光学精密机械研究所发展的聚四氟乙烯漫反射涂层, 其反射率高、光谱平坦、朗伯性好、化学稳定<sup>[11]</sup>, 并且具备一定的机械强度和加工特性。

星上积分球内定标器在相机内部切入光路实现定标, 小型轻量化是其基本要求; 然而积分球内径决定着光辐射的积分空间和能量分布, 直接影响出射面光源的尺寸、亮度和品质。因此, 积分球内径尺寸须兼顾两方面考虑。

积分球体上内置安装一对电光源和一个监视探测器; 考虑小型化积分球内部空间有限, 根据高光谱成像特点, 将其设计成如图 3 所示的跑道形, 以提高

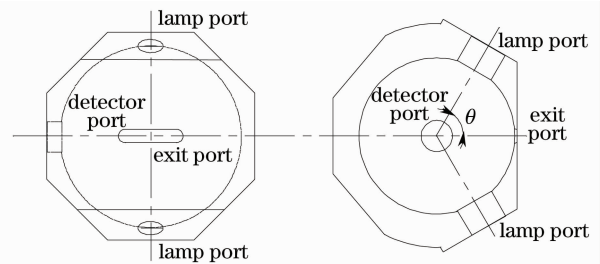


图 3 积分球体结构示意图

出口面的利用效率, 并降低积分球的开口比。

内置光源发出的光经单次反射 (和多次反射) 后从出射口出射, 对于积分球来说, 单次照明和反射差异是造成出射不均匀的主要原因。星上定标积分球内部空间有限, 不可能像地面积分球那样通过在光源与出口之间安装挡板来避免单次照明和减小单次反射差异。为了提高小型化积分球的出射均匀性, 一方面, 卤钨灯呈空间对称方式分布于积分球出口的前表面 (如图 3 所示), 这样可以尽可能地避免光源对球口的单次照明并减小单次反射角度, 积分球涂层在小角度下的反射比因子差异较小; 另一方面, 卤钨灯下半身埋于积分球涂层内, 保持灯丝面与内球面切线平齐, 这种安装方式虽然牺牲一部分能量, 但是可以有效地消除出射的非均匀性。

设光源与球心连线与开口中心线夹角为  $\theta$ , 积分球出射口最大宽度为  $d$ , 则在积分球出射平面内, 球内单次反射光路如图 4(a) 所示, 从  $(\theta - \alpha)/2$  入射、 $-\alpha$  角度反射变化到  $(\theta + \alpha)/2$  入射、 $\alpha$  角度反射; 在积分球  $-15^\circ \sim +15^\circ$  出射角度范围内, 球内单次反射光路如图 4(b) 所示, 从  $(\theta - \beta)/2$  入射、 $-\beta$  角度

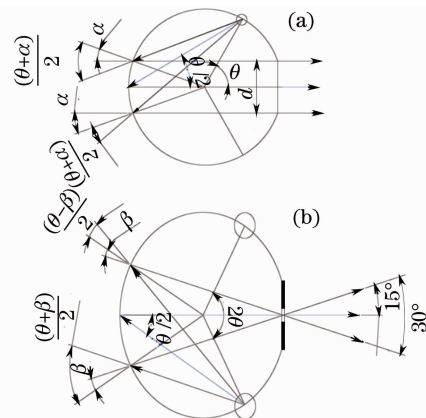


图 4 积分球内单次反射光路图。

(a) 出射平面内; (b)  $-15^\circ \sim +15^\circ$  出射角度范围内

Fig. 4 Light path of single reflection in integrating sphere. (a) within exit surface; (b) within exit angle range ( $-15^\circ \sim +15^\circ$ )

反射变化到  $(\theta + \beta)/2$  入射、 $\beta$  角度反射。可以看出, 随着  $\theta$  的增大单次反射的入射角变大; 根据积分球涂层方向反射特性, 其入射角越大, 方向反射比因子随角度的变化率就越大, 则由此造成的出射非均匀性就越大。因此, 在工程接口许可的情况下,  $\theta$  应尽可能的小。

对于石英卤钨灯, 由灯丝非朗伯性引起的照明差异不大于 1.2 倍, 则积分球的单次反射出射与总出射比为

$$R \approx 1 - \rho(1 - f) \quad (3)$$

若涂层单次反射最大差异为  $e$ , 则积分球出射面最大的非均匀性为

$$m = R(1.2e - 1)$$

### 3.3 色温校正

基于标准灯的积分球输出的辐亮度光谱与大气外太阳照射朗伯体的光谱辐亮度如图 5 所示, 前者峰值波长在  $1 \mu\text{m}$  附近, 色温约 3000 K, 后者峰值波长在  $0.5 \mu\text{m}$ , 色温约 6000 K。这种色温的差别使定标积分球辐射输出与高光谱成像仪真实遥感成像的信号水平不相匹配, 短波偏低, 红外偏高, 在大部分波段都有数量级的差别。定标光源在大部分的红外波段上只能在遥感器响应的高端响应, 甚至超出仪器动态范围。因此, 对卤钨灯进行色温校正正是高光谱星上定标积分球设计的关键。

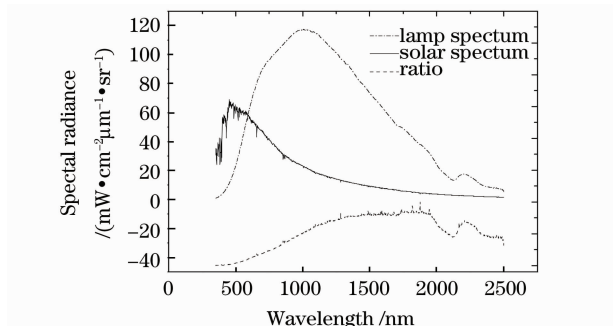


图 5 卤钨灯和太阳的辐射光谱

Fig. 5 Spectral radiances of tungsten lamps and solar

为了将光源红外光谱区辐射输出压抑到与大气外太阳照射朗伯面接近的水平。在光源前端加装色温校正器, 采取两种方式来压抑红外辐射: 一是通过反射改变灯丝红外辐射的路径、使一部分红外辐射通过灯座、球体和外壳等传导散去; 二是通过色温校正器增大吸收面积, 衰减红外辐射。

## 4 光学特性测试与分析

### 4.1 均匀性

采用基于单元探测器的小视场(针孔)成像系

统、配合二维扫描机构对积分球系统出口进行平面扫描<sup>[12,13]</sup>, 归一化的辐亮度的空间分布如图 6 所示。可以看出, 分别开启 A, B 两灯时, 在约  $20 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  的区域内, 辐亮度的最大相对百分差为 1.2%, 1.1%, 相对标准偏差分别为 0.6%, 0.5%。积分球系统出射面均匀性较高, 且分别开启两灯时, 亮度分布规律相似。积分球出口辐亮度的角度分布如图 7 所示, 在  $-15^\circ \sim +15^\circ$  范围内出口辐亮度变化不超过 1.5%。积分球出口面具有良好的朗伯特性。

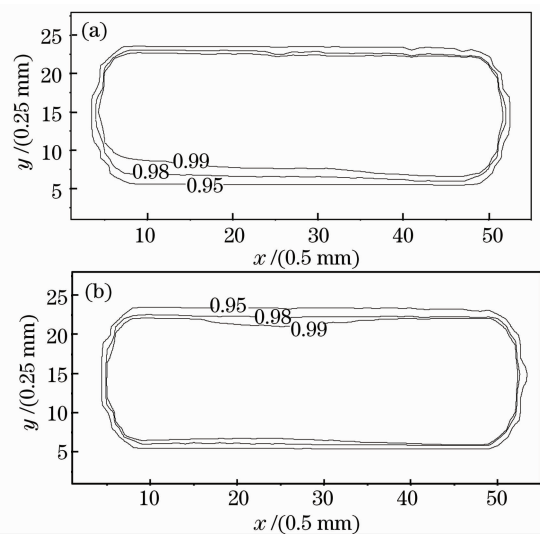


图 6 积分球系统面均匀性。(a)开启 A 灯;(b)开启 B 灯

Fig. 6 Surface uniformity of integrating sphere system.

(a) turning on lamp A; (b) turning on lamp B

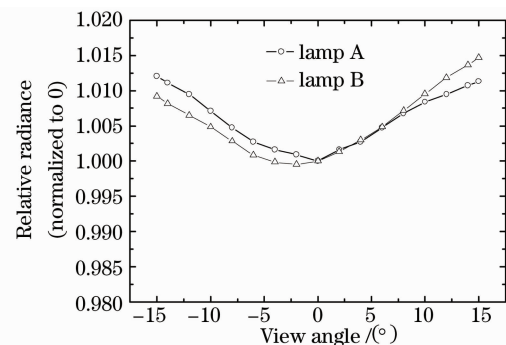


图 7 积分球系统角度均匀性

Fig. 7 Angle uniformity of integrating sphere system

研制积分球系统输出为均匀的近似朗伯面光源, 其有效面积和参照特性是可以满足高光谱遥感器星上定标要求的。

### 4.2 光谱辐射亮度

采用标准灯—漫射板系统对星上定标积分球进行预定标, 图 8 是积分球出口的辐亮度光谱, 可以看出, 经色温校正后, 红外光谱辐射得到了有效抑制,

定标光源与太阳光谱的匹配程度有了很大改善。其与大气外太阳照射理想朗伯体辐亮度的比值如表 1 所示：在可见近红外波段为 0.3~0.9、短波红外波段为 0.5~0.9；考虑遥感成像过程中大气和地表反射对太阳辐射的消减和调制作用，定标光源在宽光谱范围内（太阳反射波段）与遥感成像时的辐射水平量值相当、光谱匹配，适合可见-短波红外高光谱遥感定标应用。另外，经光谱调制后，积分球主备光源辐射输出有很好的光谱一致性，两光源互换性较好，可以备份工作，保障了系统工作的可靠性。

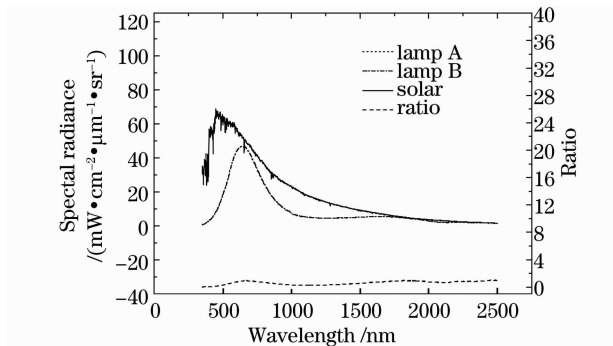


图 8 积分球系统辐亮度

Fig. 8 Spectral radiance of integrating sphere system

表 1 色温校正后辐亮度与大气外太阳照射朗伯面比较

Table 1 Radiance after color-temperature-correction comparison with exoatmosphere sun illuminate lambertian

Wavelength /nm	500	700	1700	2200
$L_{is}/(mW \cdot cm^2 \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	18.3	42.0	5.31	2.1
$L_{sun}/(mW \cdot cm^2 \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	61.9	47.1	6.47	2.61
$L_{is}/L_{sun}$	0.30	0.89	0.82	0.80

$L_{is}$ : radiance of integrating sphere;

$L_{sun}$ : radiance of exoatmosphere sun illuminate lambertian

### 4.3 稳定性

#### 4.3.1 开机稳定时间

用内置安装的陷阱式标准辐射计<sup>[14,15]</sup>，对积分

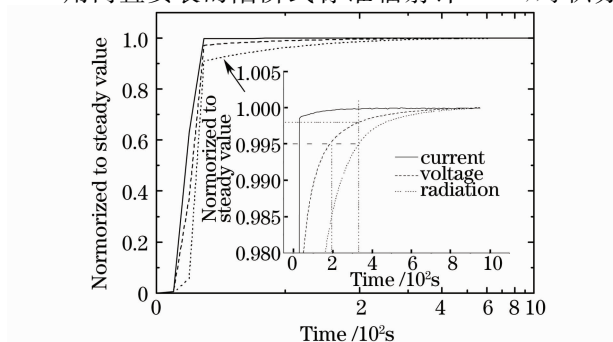


图 9 积分球系统开机稳定性

Fig. 9 Stability monitoring of integrating sphere system

球系统开机过程进行实时监测。如图 9 所示，恒流直流电源线性慢启动、约 0.5 min 达到电流指示值，然后很快趋于稳定，相应电压和辐射在 3.5 min 分别达到其稳定值的 0.995, 0.985，在 5 min 分别达到其稳定值的 0.998, 0.995。因此，积分球在星上定标应用时以 5 min 为积分球系统的开机稳定时间，具有较高的工作效率。

#### 4.3.2 长期稳定性

星上定标积分球系统的光学稳定性是其重要工作参数，其中光源稳定性决定着其工作寿命。图 10 是选用光源长期稳定性实验结果，横坐标为点灯时间，纵坐标为实测灯泡端电压与理论输出电压的相对误差，可以看出灯泡连续工作 300 h，相对差别约 0.3%。同时，星上定标积分球系统寿命试验证明，其持续工作 200 h 辐射输出变化为 1.37%。

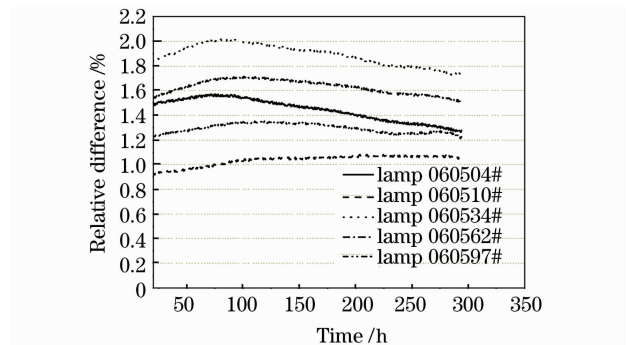


图 10 钨钨灯长期稳定性试验

Fig. 10 Test of long stability for tungsten lamp

## 6 结 论

本文针对高光谱遥感技术的发展，研究了一种新型的星上定标积分球系统，采用色温校正技术解决了星上定标器光谱一致性问题，并解决了积分球的出射均匀性、稳定性等技术难题。结果表明，辐亮度输出在太阳反射波段达到 0.9 倍的大气外太阳照射朗伯面的水平；面均匀性、±15°出射角内的角度均匀性优于 0.99, 0.985；开机 5 min 内达到稳定状态，辐射输出在 200 h 内具有长期稳定性。积分球系统重量和体积分别小于 1.2 kg, 0.002 m<sup>3</sup>，并且通过了航天级机械振动和高低温循环试验，能够满足可见-短波红外高光谱卫星遥感器星上定标要求。

致谢 在本文研究工作过程中与中科院长春光学与物理研究所颜昌翔、郑玉权、于平、刘伟等老师进行了广泛交流和探讨，深表感谢。

## 参 考 文 献

- 1 R. O. Green, T. G. Chrien, I. J. Nieison *et al.*. Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS): recent improvements to the sensor and data facility[C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 180~190
- 2 S. K. Babey, C. D. Anger. Compact airborne spectrographic imager (CASI): a progress review [C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 152~163
- 3 B. M. Braam, J. T. Okkonen, M. Aikio *et al.*. Design and first test results of the finnish airborne imaging spectrometer for different applications(AISA)[C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 142~151
- 4 L. J. Rickard, R. W. Basedow, E. F. Zaiewski *et al.*. HYDICE: an airborne system for hyperspectral imaging [C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 173~179
- 5 Davisco, J. Bowies, R. A. leathers *et al.*. Ocean PHHIS hyperspectral imager: design, characterization, and calibration[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(4): 210~221
- 6 Xue Long, Li Jing, Liu Muhua. Detecting pesticide residue on navel orange surface by using hyperspectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2277~2280  
薛 龙, 黎 静, 刘 木 华. 基 于 高 光 谱 图 像 技 术 的 水 果 表 面 农 药 残 留 检 测 试 验 研 究 [J]. *光 学 学 报*, 2008, **28**(12): 2277~2280
- 7 Yang Yuezhong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107  
杨 跃 忠, 曹 文 熙, 孙 兆 华 等. 海 洋 高 光 谱 辐 射 实 时 观 测 系 统 的 研 制 [J]. *光 学 学 报*, 2009, **29**(1): 102~107
- 8 Tong Qingxi, Zhang Bin, Zheng Lanfen. Hyperspectral Remote Sensing[M]. Beijing: Higher education press, 2006. 40~45  
童 庆 禧, 张 兵, 郑 兰 芬. 高 光 谱 遥 感 [M]. 高 等 教 育 出 版 社, 2006. 40~45
- 9 M. Dinguirard, P. N. Slater. Calibration of space-multispectral imaging sensors; areview [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **68**: 194~205
- 10 G. McKee, S. Pal, H. Seth *et al.*. Design and characterization of a large area uniform radiance source for calibration of a remote sensing imaging system [C]. *SPIE*, 2007, **6677**(667706): 1~9
- 11 C. J. Bruegge, A. E. Stiegman, A. W. Springsteen *et al.*. Reflectance stability analysis of spectralon diffuse calibration panels [C]. *SPIE*, 1991, **1493**: 132~142
- 12 Xu Xiaofeng, Wang Ji, Zhang Liming *et al.*. Study on uniformity measurements of space integrating sphere [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(5): 817~820  
徐 晓 峰, 王 冀, 张 黎 明 等. 航 天 积 分 球 面 均 匀 性 检 测 研 究 [J]. *量 子 电 子 学 报*, 2005, **22**(5): 817~820
- 13 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Radiometric characteristics test of integrating sphere source using wavelength-tunable laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1310~1314  
徐 秋 云, 郑 小 兵, 张 伟 等. 利 用 可 调 谐 激 光 的 积 分 球 光 源 辐 射 特 性 测 试 [J]. *光 学 学 报*, 2009, **29**(5): 1310~1314
- 14 Zheng Xiaobin, Wu Haoyu, Zhang Junping *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optical Sinica*, 2001, **21**(6): 749~752  
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
- 15 Chen Feng, Li Shuang, Wang Ji *et al.*. Linearity measurement of accurate photodetector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 889~893  
陈 风, 李 双, 王 骥 等. 高 精 度 光 电 探 测 器 的 线 性 测 量 [J]. *光 学 学 报*, 2008, **28**(5): 889~893