

基于绝对辐亮度计定标的积分球紫外光谱辐射特性研究

杨小虎^{1,2} 王淑荣¹ 曲艺¹ 黄煜¹ 林冠宇¹
〔¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033〕
〔²中国科学院研究生院, 北京 100049〕

摘要 针对积分球开口光谱辐射特性测量的复杂性及紫外波段标准光源不确定度大的缺点, 构建了一种基于紫外标准探测器的高精度绝对辐亮度计。用所构建的绝对辐亮度计, 以3个波长为例, 标定积分球开口光谱辐亮度, 修正了250~400 nm波段积分球开口光谱辐亮度曲线。同时, 利用该绝对辐亮度计对积分球输出稳定性、积分球开口均匀性以及朗伯余弦特性进行了全面测试。积分球开口3个波长280, 313和352 nm处光谱辐亮度定标合成标准不确定度分别为3.2%, 3.0%和3.0%, 积分球输出稳定性、开口均匀性以及朗伯余弦特性3个波长处合成标准不确定度分别为1.7%, 1.6%和1.6%。不确定度分析表明用绝对辐亮度计研究积分球光谱辐射特性与传统的积分球光谱辐射特性研究相比方便可行且精度更高。

关键词 测量; 辐射定标; 绝对辐亮度计; 光谱辐射特性; 辐亮度定标

中图分类号 TP706 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1008007

Research of UV Spectral Radiance Characteristics of the Integrating Sphere Based on Calibration by the Absolute Radiance Radiometer

Yang Xiaohu^{1,2} Wang Shurong¹ Qu Yi¹ Huang Yu¹ Lin Guanyu¹
〔¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China〕
〔²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China〕

Abstract A high precision absolute radiance radiometer based on the ultraviolet (UV) standard detector is made up according to the complexity of the normal measurement of the spectral radiometric characteristics of the integrating sphere and the disadvantage of the huge uncertainty of the standard lamp in UV band. Calibration in three wavelengths is done so as to correct the curve of the aperture's spectral radiance of the integrating sphere in 250~400 nm bands. Also the stability of the output, the uniformity of the aperture and the Lambert's cosine characteristic of the integrating sphere are measured. The combined standard uncertainty in 280, 313 and 352 nm is 3.2%, 3.0% and 3.0% for the spectral radiance calibration and 1.7%, 1.6% and 1.6% for the stability of the output, the uniformity of the aperture and the Lambert's cosine characteristic of the integrating sphere. Uncertainty analysis shows that research based on the absolute radiance radiometer is convenient, feasibility and has a higher precision in contrast to the traditional research of spectral radiance characteristics.

Key words measurement; radiometric calibration; absolute radiance radiometer; spectral radiometric characteristics; radiance calibration

OCIS codes 120.5630; 350.5610; 150.1488

收稿日期: 2011-05-20; 收到修改稿日期: 2011-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(41074126)和吉林省青年科研基金(20090118)资助课题。

作者简介: 杨小虎(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事空间紫外遥感仪器辐射定标方面的研究。

E-mail: yangxiaohu861106@163.com

导师简介: 王淑荣(1961—), 女, 研究员, 主要从事空间紫外遥感仪器方面的研究。

E-mail: srwang@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

近十几年来,随着空间遥感仪器对地观测研究的不断深入及遥感仪器精度的不断提高,积分球尤其是大口径积分球,作为仪器在地面定标的辐射源起着越来越重要的作用。美国国家航空航天局(NASA)的Heath等^[1]十几年前就已经采用内部照明的积分球作为SBUV-2仪器的光谱辐亮度响应度定标光源,并且得到了较理想的结果。评价积分球辐射源的技术指标主要有输出稳定性、绝对光谱辐亮度、开口均匀性和朗伯余弦特性以及输出线性等。但是积分球本身并不具有绝对的标准辐射值,作为遥感仪器辐射定标的亮度源,其光谱辐亮度值要通过其他标准传递而来,对于积分球的输出稳定性、开口均匀性等其他特性则需要通过另外的仪器来检测^[2]。

目前,国际上通用的是按照McLean等^[3]提出并由Walker等^[4]改进的方法——通过朗伯体和光谱辐射计构成新的组合辐射计,将标准灯的光谱辐照度传递给积分球开口的光谱辐亮度。为保证精度,积分球半径、积分球开口面与组合辐射计的距离、组合辐射计有效视场的等效半径必须满足一定的条件^[3-5]。尽管如此,由于紫外波段标准灯本身不确定度较大,积分球紫外波段光谱辐亮度也不可避免地具有较低的精度。鉴于此,本文利用高精度紫外光谱仪和石英漫透射板构成紫外组合辐射计,将250~400 nm波段美国国家标准技术研究院(NIST)标定的标准石英卤钨灯光谱辐照度传递给Spheroptics公司TX-20Z UV积分球,以不确定度更小的NIST紫外标准探测器为基础构建了一台绝对辐亮度计,在3个波长处对积分球光谱辐亮度进行高精度的标定,并修正前面传递的积分球250~400 nm波段光谱辐亮度。同时,用所构建的绝对辐亮度计对积分球其他特性进行全面系统的测试。根据Heath^[6]对类似积分球系统的研究表明,由氙灯照明的Zenith材料积分球用于紫外波段亮度定标不仅可行而且是更佳的选择,因此本文对TX-20Z UV积分球辐射特性的研究都只针对其氙灯光源而言^[7]。

2 绝对辐亮度计的原理及构建

绝对辐亮度计是基于绝对光谱辐通量、辐照度或辐亮度响应度中任意一种已知的标准探测器和窄带滤光片,通过测量已知固定不变立体角内的光谱

辐射通量,继而反推出该立体角所对应均匀面光源的辐亮度。

辐亮度计分成像式和遮光筒式两类,遮光筒式辐亮度计结构简单,无任何光学元件,无需考虑成像系统透射率和像差等因素引起的误差。图1中所用探测器为NIST紫外标准探测器I677,遮光筒内加3块抑制杂光的挡板,探测器前加入滤光片轮,放入中心波长为280, 313, 352 nm的3块紫外滤光片,带宽分别为15, 10和10 nm,探测器上的点P与前开口所张平面角为 2α 对应的立体角 Ω 为

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha). \quad (1)$$

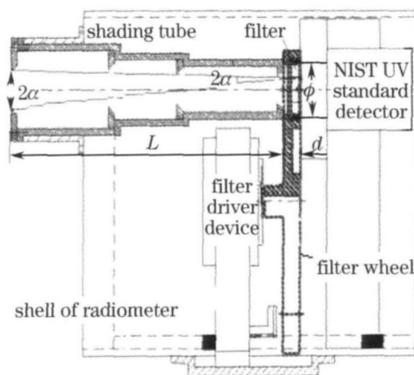


图1 绝对辐亮度计结构图

Fig. 1 Structure of the absolute radiance radiometer

当 $2\alpha \ll L + d$ 且 $\phi \ll L + d$ 时,(1)式对受光面的任何点都成立,因而认为(1)式即为该辐亮度计的立体角。NIST紫外标准探测器直径 $\phi = 10$ mm,遮光筒长度 $L = 190$ mm,滤光片轮厚度 $d = 11.6$ mm,前开口光阑直径 $2\alpha = 10.84$ mm,视场角 $2\alpha = 3.078^\circ$,对应立体角由(1)式求得为 $\Omega = 2.267 \times 10^{-3}$ sr。

3 绝对辐亮度计标定积分球

绝对辐亮度计标定积分球原理如图2所示,探测器处(滤光片后)、滤光片前、前开口处以及积分球开口处的通量、亮度及面积分别以图中字母表示。

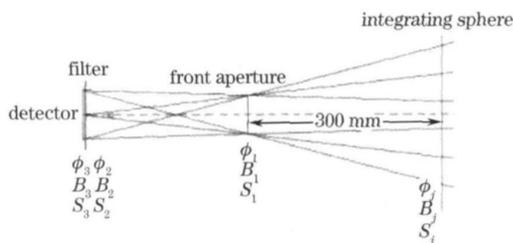


图2 绝对辐亮度计标定积分球原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the integrating sphere calibrated by the absolute radiance radiometer

滤光片透射率为 T , 探测器与前开口距离为 $L + d$, 探测器输出信号电流为 I , 探测器标准通量响应度为 R_ϕ .

元光管内光亮度传播特性可表示为

$$B_2(\lambda) = B_1(\lambda), \quad (2)$$

$$B_1(\lambda) = B_j(\lambda), \quad (3)$$

而

$$B_3(\lambda) = B_2(\lambda)T(\lambda). \quad (4)$$

探测器接收的光通量为

$$\phi_3(\lambda) = B_3(\lambda) \Omega S_3, \quad (5)$$

同时探测器输出信号电流为

$$I(\lambda) = R_\phi(\lambda) \phi_3(\lambda), \quad (6)$$

辐射计立体角为

$$\Omega = \frac{S_2}{(L + d)^2}. \quad (7)$$

由(2)~(7)式求得实测电流与各已知量及待测积分球开口光谱辐亮度的关系为

$$I(\lambda) = R_\phi(\lambda) B_j(\lambda) T(\lambda) \frac{S_3 S_2}{(L + d)^2}. \quad (8)$$

由于滤光片具有一定带宽, 实测电流信号将是整个带宽内所有波长($\lambda \sim \lambda$) 贡献的总和为

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\phi(\lambda) B_j(\lambda) T(\lambda) \frac{S_3 S_2}{(L + d)^2} d\lambda \quad (9)$$

滤光片有效带宽较小, 且有效带宽内积分球开口的光谱辐亮度没有剧烈的起伏, 可以认为该带宽内积分球开口的光谱辐亮度

$$I = B_j \frac{S_3 S_2}{(L + d)^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\phi(\lambda) T(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

不变。(10)式所求得的 B_j 为对应滤光片中心波长处的积分球开口光谱辐亮度。

3.1 积分球输出稳定性

积分球输出稳定性是其作为标准亮度源的首要条件。用图 1 所示的绝对辐亮度计同等条件下不间隔地监测积分球 3 个波长处的光谱辐亮度值, 结果如图 3 和图 4 所示。

由图 3 积分球短期稳定性可看出, 积分球点亮 1 h 之内波动为 $\pm 2\%$, 随后趋于稳定, 稳定性在 0.5% 以内, 持续开启 7 h 左右, 部分波段衰减已达 0.5%, 因此, 为确保短期内积分球信号稳定性, 应尽量在积分球开启 1~7 h 之内进行实验。另一方面, 由于积分球长期稳定性监测是一个经年累月的过程, 一般是每月或每工作 100 h 监测一次, 经过大量的数据积累后才能看出其长期变化趋势。作为一个

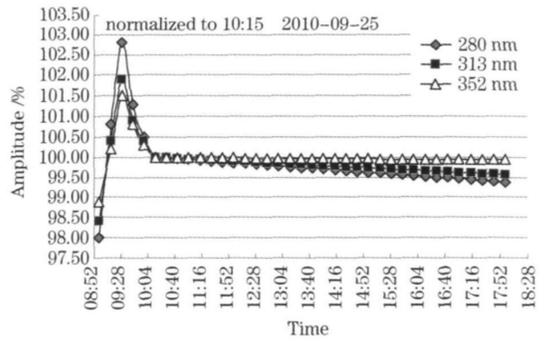


图 3 积分球的短期稳定性

Fig. 3 Short-term stability of the integrating sphere

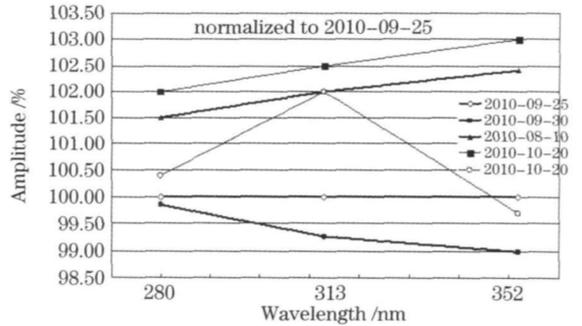


图 4 积分球的长期稳定性(参考)

Fig. 4 Long-term stability of the integrating sphere (demonstration)

参考, 图 4 画出了某几天内的监测情况。从图 4 可以看出, 积分球亮度不同天之间存在 0.2%~1.5% 的显著变化, 这主要跟供电电源的相对不稳定性以及积分球内表面的污染性有关^[8-11]。因此, 为减小积分球长期稳定性的影响, 积分球需要定期进行标定。

3.2 积分球开口光谱辐亮度

利用 FY-3 号紫外臭氧垂直探测仪和石英漫透射板构成的紫外组合辐射计将标准灯光谱辐照度传递给积分球开口光谱辐亮度的过程如图 5 所示^[12-14]。石英漫透射板紧贴在臭氧垂直探测仪开口光阑前面, 臭氧垂直探测仪有效视场在石英漫透

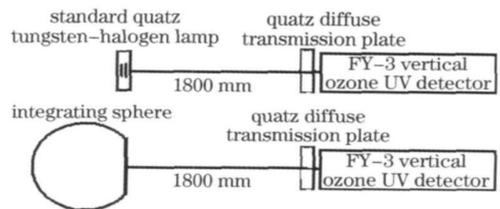


图 5 积分球开口光谱辐亮度传递过程

Fig. 5 Transfer procedure of aperture's spectral radiance of the integrating sphere

射板上的投影为长 33 mm、宽 19.1 mm 的矩形,其等效面积圆的半径 $r_2 = 14.16$ mm,积分球半径 $r_1 = 101.6$ mm,积分球开口面与紫外组合辐射计有效视场距离 $d = 1800$ mm,根据 Walker 等^[4]的计算此时利用积分球某一距离处的照度推导积分球开口亮度近似公式的误差可以忽略不计。

按图 2 所示将组合紫外辐射计换成绝对辐亮度计,标定积分球 3 个波长处开口绝对光谱辐亮度,并修正上述源自标准灯的光谱辐亮度。图 6 即为 250~ 400 nm 波段紫外组合辐射计及 3 个波长处绝对辐亮度计标定的积分球开口光谱辐亮度及修正曲线。

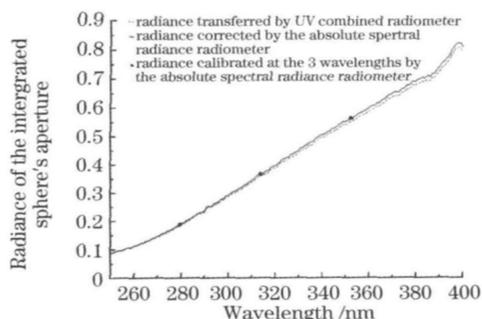


图 6 积分球开口光谱辐亮度

Fig. 6 Aperture's spectral radiance of the integrating sphere

3.3 积分球开口均匀性

积分球作为辐射标准光源是因为它能提供近似朗伯辐射体的大面积均匀亮度源,因此,积分球开口均匀性是其非常重要的指标^[15-17]。将绝对辐亮度计固定在二维调节架上,为减小来自绝对辐亮度计前表面反射的光进入积分球从而改变积分球开口的实际输出,按图 2 所示调节距离,结合绝对辐亮度计尺寸及立体角算出此时绝对辐亮度计有效视场在积分球开口面上的投影为直径 $\phi = 2.7$ cm 的圆。基于信噪比考虑选择 352 nm,在积分球开口上 25 个位置测试其相对亮度。

图 7 即为实测积分球开口均匀性, TX-20Z-UV 积分球系统整个开口的均匀性为 $-1.1\% \sim +1.3\%$ 。从图 7 中可明显看出积分球开口右边比左边亮,下边比上边亮,经分析主要是由于积分球氙灯光源从开口左下角往右下角入射,右下角比左上角经历的漫反射次数少的缘故。

3.4 积分球朗伯余弦特性

朗伯辐射体的另一重要特性就是余弦特性——朗伯辐射体各方向的光亮度均相同^[15-17]。实验室

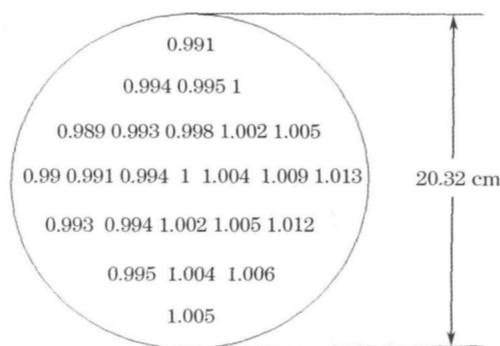


图 7 积分球 352 nm 开口均匀性

Fig. 7 Aperture's uniformity at 352 nm of the integrating sphere

积分球常用的角度范围一般很窄,且考虑到实验的可行性,只考察 $\pm 30^\circ$ 内水平垂直两方向积分球开口辐亮度的相对变化,其中绝对辐亮度计视场中心始终观测积分球开口中心区域且两者距离尽量保持不变。积分球 352 nm 处辐亮度余弦特性如图 8 所示, $\pm 30^\circ$ 内余弦特性影响为 $-0.4\% \sim +0.5\%$ 。

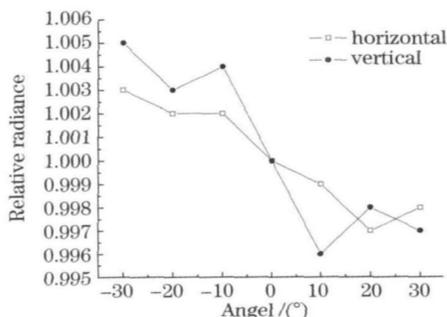


图 8 积分球开口 352 nm 朗伯余弦特性

Fig. 8 Lambert's cosine characteristic at 352 nm of the integrating sphere

4 不确定度分析

绝对辐亮度计用于积分球开口辐射特性检测时,不确定度来源主要有积分球电源的稳定性、绝对辐亮度计的不确定度和杂散光三个方面,而绝对辐亮度计的不确定度又包括: NIST 紫外标准探测器不确定度、滤光片引入的不确定度、立体角计算不确定度以及测试过程中探测器的温度变化特性等。

积分球电源的稳定性为 0.5%;

由 NIST 紫外标准探测器自身携带的标准数据知 3 个波长处标准不确定度依次为: 0.55%, 0.50%, 0.28%;

Lambda 950 测量滤光片透射率重复性为 0.2%,此外,由标准探测器推导辐亮度计的标准亮

度时,实际滤光片为非理想窄带滤光片,将各滤光片透射率测量值导入 Origin 软件求积分,得出中心波长透射率分别为: 0. 267, 0. 637, 0. 521, 透射率曲线积分分别为: 4, 6. 367, 5. 207。这样因滤光片中心波长透射率与等效带宽乘积代替实际各波长透射率曲线积分引入的不确定度分别为: 0. 5%, 0. 3% 和 0. 3% ;

由图 1 及(1)式可知标准辐亮度计因滤光片(厚 3.2 mm)材料折射率 1. 458 及游标卡尺(精度 0.02 mm)测量距离 $L+d$ 引起的立体角计算不确定度约 0.75% ;

NIST 紫外标准探测器标定温度为(23. 3 ± 0.5) °C, 实验室中用温度计对实验室环境温度进行监测为(24. 6 ± 0.3) °C, 由标准探测器温度响应曲线知该不一致性引起不确定度为 0.015% ;

由于辐亮度计标准探测器位于内部发黑处理的辐亮度计外壳中,遮光筒与滤光片轮系统及探测器均紧密相连,紫外波段杂散光对辐亮度计影响约 0.1% 。

的积分球开口位置、方向以及时间都与绝对辐亮度计单次测量积分球开口光谱辐亮度时不同,因此 3 个波长处的合成标准不确定度都必须考虑积分球输出稳定性、开口亮度均匀性和朗伯余弦特性各自的不确定度大小,这样,用绝对辐亮度计标定积分球开口光谱辐亮度的总的合成标准不确定度分别为 3. 2%, 3. 0% 和 3. 0% 。

实验室中对积分球开口辐亮度的标定主要是通过光谱辐射计和朗伯体构成的组合辐射计从标准灯光谱辐照度传递而来,尽管使用的光谱仪器和朗伯体各不相同,其结果却都受标准灯不确定度的影响。而积分球的输出稳定性、均匀性等特性则需要通过其他仪器来检测,整个过程既不方便,精度也低。

5 结 论

基于 NIST 紫外标准探测器构建的绝对辐亮度计,通过选取 3 个波长定标并结合氙灯的相对光谱分布不仅给出了更高精度的积分球开口光谱辐亮度分布,而且非常方便地检测了积分球的其他辐射特性。积分球输出稳定性、开口亮度均匀性和朗伯余弦特性三种特性总的合成标准不确定度在 3 个波长处分别为 1. 7%, 1. 6% 和 1. 6%, 积分球开口光谱辐亮度 3 个波长处总的合成标准不确定度分别为 3. 2%, 3. 0% 和 3. 0%。从不确定度分析表中可以看出绝对辐亮度计滤光片以及立体角是影响测量结果不确定度的主要因素。因此后续的测量应有针对性地选择更接近理想的窄带滤光片以及精确计算辐亮度计的立体角,进一步提高该方法的精度。

参 考 文 献

- 1 D. F. Heath, Zhongying Wei, W. K. Fowler *et al.*, Comparison of spectral radiance calibrations of SBU V-2 satellite ozone monitoring instruments using integrating sphere and flat-plate diffuser techniques[J]. *Metrologia*, 1993, **30**: 259~ 264
- 2 Wang Rui, Wang Shurong, Li Futian *et al.*, Investigation on radiation calibration system of vacuum ultraviolet detector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1026~ 1030
王 锐, 王淑荣, 李福田等. 真空紫外探测器辐射定标研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1026~ 1030
- 3 J. T. McLean, B. W. Guenther. Radiance calibration of spherical integrators [J]. *Optical Radiation Measurements II, Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Engng.*, 1989, **1109**: 114~ 121
- 4 J. H. Walker, C. L. Cromer. A technique for improving the calibration of large area sphere sources [C]. *SPIE*, 1991, **1493**: 224~ 230
- 5 Xing Jin, Wang Shurong, Li Futian. Comparison of spectral radiance calibrations of spectroradiometer for ultraviolet space remote sensing using three calibration techniques[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 509~ 515
邢 进, 王淑荣, 李福田. 空间紫外遥感光谱辐射计光谱辐亮度

表 1 绝对辐亮度计检测积分球开口辐射特性的不确定度分量

Table 1 Uncertainties of radiated characteristic of the integrating sphere calibrated by the absolute radiance radiometer

Uncertainty sources	280 nm	313 nm	352 nm
Stability of the source / %		0. 5	
NIST UV standard detector / %	0. 55	0. 5	0. 28
Measurement repeatability of Lambda 950 / %		0. 2	
Approximate bandwidth / %	0. 5	0. 3	0. 3
Solid angle / %		0. 75	
Temperature variety of detector / %		0. 015	
Stray light / %		0. 1	
Combined standard uncertainty / %	1. 2	1. 1	1. 1

表 1 即为绝对辐亮度计单次测量积分球开口辐射特性的不确定度来源和大小,积分球输出稳定性、开口亮度均匀性和朗伯余弦特性三种特性测的都是亮度的相对大小且单次测量之间不相关,根据不确定度合成原理,总的合成标准不确定度为单次测量不确定度的 $\sqrt{2}$ 倍,即 3 个波长处分别为 1. 7%, 1. 6% 和 1. 6%。积分球开口光谱辐亮度是单次测量,考虑到该测量数据是为提供遥感仪器在实验室定标下的标准光谱辐亮度,而遥感仪器定标时观测

- 定标三种方法的比较[J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 509~ 515
- 6 D. F. Heath. Large aperture spectral radiance calibration source for ultraviolet remote sensing instruments [C]. *SPIE*, 2003, **4891**: 335~ 342
- 7 James H. Walker, Ambler Thompson. Spectral radiance of a large-area integrating sphere source[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1995, **100**(1): 37~ 41
- 8 Leibo Ding, Matthew G. Kowalewski, John W. Cooper *et al.*. Development of a filter radiometer monitor system for integrating sphere sources[C]. *SPIE*, 2009, **7452**: 745206
- 9 John Marketon, Peter Abel, James J. Butler *et al.*. Integrating sphere source monitoring and stability data[C]. *SPIE*, 2003, **4881**: 378~ 385
- 10 Ping-Shine Shaw, Zhigang Li, Uwe Arp *et al.*. Ultraviolet characterization of integrating spheres[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5119~ 5128
- 11 Ping-Shine Shaw, Zhigang Li. On the fluorescence from integrating spheres[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(21): 3962~ 3967
- 12 Wang Shurong, Xing Jin, Li Futian. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 185~ 190
王淑荣, 邢进, 李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(2): 185~ 190
- 13 Wang Rui, Song Kefei. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 469~ 474
王锐, 宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(3): 469~ 474
- 14 Zhang Zhenduo, Wang Shurong, Li Futian *et al.*. Study on calibration method of spectral irradiance responsivity for space ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1816~ 1821
张振铎, 王淑荣, 李福田等. 空间紫外遥感仪器光谱辐照度响应度定标方法研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1816~ 1821
- 15 Charles K. Gatebe, James J. Butler, John W. Cooper *et al.*. Characterization of errors in the use of integrating sphere systems in the calibration of scanning radiometers[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(31): 7640~ 7651
- 16 Xing Jin. Study on UV-VUV radiometric standard and high precision radiometric calibration for space remote sensing instrument[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 54~ 100
邢进. 空间遥感仪器紫外-真空紫外光谱辐射标准及高精度辐射定标的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005. 54~ 100
- 17 Zhang Junping, Wu Haoyu, Zhou Wei *et al.*. Experimental study of spectral radiance characteristics of large aperture integrating sphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(5): 424~ 428
章骏平, 吴浩宇, 周威等. 大孔径积分球辐射源光谱辐射特性测试方法研究[J]. 量子电子学报, 2001, **18**(5): 424~ 428