

文章编号 1004-924X(2006)02-0185-06

# 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计

王淑荣<sup>1</sup>, 邢进<sup>1,2</sup>, 李福田<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所应用光学

国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 基于内部照明积分球的辐亮度定标方法, 获得了接近理想的大面积辐亮度光源( $\sim 2\%$ ), 标定了在研的空间紫外遥感光谱辐射计的亮度响应度。在假设标准灯为均匀亮度的点光源情况下, 对照明因子进行了修正。同时利用两种漫反射板对此修正进行了实验研究, 得到了采用两种漫反射板标定的光谱辐射计亮度响应度有很好的 consistency (1%) 的结论。初步的定标数据分析显示, 石英卤钨灯光谱辐照度测量的相对不确定度和距离测量的不确定度是积分球定标最主要的不确定度来源, 可用于紫外波段光谱辐射计的高精度辐射定标, 并可以极大地降低定标不确定度。

**关键词:** 光谱辐亮度定标; 紫外遥感光谱辐射计; 积分球; 漫反射板

**中图分类号:** TP73 **文献标识码:** A

## Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere

WANG Shu-rong<sup>1</sup>, XING Jin<sup>1,2</sup>, LI Fu-tian<sup>1</sup>

( 1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*  
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** A calibration technique based on internally illuminated integrating sphere was presented, and the large area uniform ( $\sim 2\%$ ) source of radiance close to ideal source was achieved, the radiance responsivities of the ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space under development were obtained. Under the condition that FEL standard lamp was assumed to be a uniform point source, the illuminating factors of both sources were corrected, in the mean time, two kinds of diffusers were involved in the experimental research for this correction. A conclusion is given that the radiance responsivities of the spectroradiometer obtained through these two kinds of diffusers are consistent within 1%. A preliminary analysis of calibration data shows that the uncertainty of the spectral irradiance measurement in the quartz tungsten halogen lamp and the uncertainty in distance measurement are the major factors of uncertainty in the sphere calibration technique. This technique can be used to improve the precision of calibration in ultraviolet wavelength range, and the uncertainty in calibration can be reduced significantly too.

收稿日期: 2005-12-22; 修订日期: 2006-01-12.

基金项目: 2004 年应用光学国家重点实验室基金支持。

**Key words:** spectral radiance calibration; ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space; integrating sphere; diffuser

## 1 引言

空间遥感光谱辐射计是真实地获取大气环境第一手资料的常用仪器。通过测量各波段经大气散射的光谱辐亮度和太阳直射的光谱辐照度,反演计算出大气中各种微量气体和气溶胶的含量,以监测全球温室效应、臭氧层厚度变化和各种有害气体的排放等等。

使用标准光源来定标光谱辐射计是广泛采用的一种办法,然而,对于空间遥感光谱辐射计而言,光谱辐亮度标准—高温黑体或钨带灯都没有足够大的发射面积来充满其较大的视场。因此,多使用光谱辐照度标准灯和标准漫反射板产生近似朗伯体的大面积光源来进行标定。在 250~400 nm 的紫外波段,利用标准灯和漫反射板进行辐亮度定标的不确定度一直徘徊在较低的水平(5%~8%),这主要是由于辐照度标准灯在低于 300 nm 时不确定度较大和漫反射板双向反射分布函数(BRDF)的测量有较大的不确定度所致。另外,平面漫反射板定标方法还存在亮度均匀性不十分理想的问题,故此,高精度光谱辐射的标定均避免直接使用平面漫反射板定标方法。

近年来<sup>[1]</sup>,有人提出了基于内部照明的积分球光谱辐亮度定标,由于抵消了漫反射板的影响,精度得到了较大的提高。本文应用积分球光谱辐亮度定标方法,标定了我所研制的空间紫外遥感光谱辐射计的光谱辐亮度响应度。初步的定标数据分析与比对显示,使用积分球作为大面积均匀亮度源来定标光谱辐射计,可以极大地降低辐亮度定标不确定度,从而实现空间紫外遥感光谱辐射计高精度光谱辐射定标。

## 2 积分球定标原理及方法

利用内部照明的积分球进行光谱辐亮度定标需要光谱辐照度传递,就是将中国计量院的 FEL 标准灯的光谱辐照度传递到积分球上来,如图 1(a)所示。由中国计量院定标的 1 000 W 光谱辐照度标准石英卤钨灯(FEL),在  $h=50,100$  cm 的

距离沿法线方向照明 30 cm×30 cm 漫反射板(本文中漫反射板材料为 spectralon)。光谱辐射计与漫反射板法线成 33° 观测漫反射板的中心区域。应注意,仪器和漫反射板实际上组成了新的光谱辐射计系统,用于将 FEL 标准灯的照度传递到积分球的开口上来,漫反射板 BRDF 的影响就被完全地消除了。仪器的入射狭缝距漫反射板 50 cm,仪器的视场投影到漫反射板上是一个上底为 9.5 cm,下底为 11.5 cm,高为 16.8 cm 的梯形。

平面漫反射板经光谱辐照度标准灯照明,在仪器观测方向的平均光谱辐照度由(1)式<sup>[2]</sup>:

$$\overline{E(\lambda)} = E_l(\lambda) \times \cos \theta \times \omega(x, y) \times f(x, y), \quad (1)$$

沿光谱辐射计观测视场积分得到。

其中,  $E_l(\lambda)$  是中国计量院在距离  $l$  (通常为 100 cm) 处标定的 FEL 标准灯的光谱辐照度;  $\theta$  是照明漫反射板方向相对法线的夹角;  $\omega(x, y)$  是由光源尺寸决定的离轴照明修正因子;  $f(x, y)$  是在仪器视场投影面积上 FEL 标准灯光谱辐照度随角度的变化。

由于 FEL 标准灯光源尺寸较小,修正因子  $\omega(x, y)$  可以忽略,在将 FEL 标准灯看作均匀亮度源的情况下,式(2)沿光谱辐射计观测视场的积分为:

$$\overline{E(\lambda)} = E_l(\lambda) \times \frac{l^2}{h^2 + r^2}, \quad (2)$$

其中,  $h$  是 FEL 标准灯与漫反射板之间的距离;  $r$  是将光谱辐射计在漫反射板上的投影视场等效为相同面积的圆的半径(本文中为 7.5 cm),用  $r_2$  表示。

为了验证这种做法的正确性,仪器分别对距漫反射板 50, 100 cm 的 FEL 标准灯进行观测。在 250~340 nm 选择 12 个波长进行观测(一般比较关心同时也难以准确标定的也是这个波长范围),两次观测的比值为 3.924(20 个比值平均),标准偏差为 0.45%。计算比值为 3.934,比观测值大了 0.25%。从中可以看出省略  $\omega(x, y)$  给定标带来的影响很小。

Walker<sup>[1]</sup>提出了一种改善光谱辐射定标精度的技术,这种基于内部照明的积分球的技术在

10 年前就被 Heath<sup>[2]</sup> 应用标定了 SBUV-2 仪器的光谱辐亮度,并得到了较好的结果。困于当时的技术水平,积分球的涂料是 BaSO<sub>4</sub>,在内置卤钨灯的照射下反射率 < 350 nm 有着明显的衰减,使数据的重复性受到影响,而且卤钨灯照明的积分球在紫外波段很难有较高的亮度输出,给准确定标仪器带来困难。近年来,得益于技术的发展,内部涂料为高分子材料(spectralon 或聚四氟乙烯等)的积分球才实现了商业化。

本实验选择了 Sphereoptics 公司的 TX-20Z-UV 积分球系统。该积分球直径 20 in (50.8 cm),开口直径 8 in(20.32 cm),其内部涂料为 spectralon 材料,具有良好的朗伯余弦特性和抗紫外辐射特性。系统由卤钨灯和氙灯混合照明,在 250~400 nm 波段提供了极强的亮度输出和良好的均匀性。Heath<sup>[3]</sup> 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光谱辐射计亮度定标不仅可行而且是更佳的选择。

图 1(b)积分球照明漫反射板,与图 1(a)唯一的不同就是 FEL 标准灯的位置由积分球的开口代替了。这样就可以确定出积分球在 50, 100 cm 的照度。

根据朗伯辐射体的热传导理论,在假设积分球为朗伯辐射体的情况下,距离内部照明的积分球开口  $d$  处的照度可以由式(3)表示<sup>[2]</sup>:

$$E_d(\lambda) = [\pi r_1^2 / (d^2 + r_1^2 + r_2^2)] \cdot L(\lambda) = G(d, r_1, r_2) \cdot L(\lambda), \quad (3)$$

其中, $E_d(\lambda)$ 为距离积分球开口  $d$  处的光谱辐照度; $L(\lambda)$ 为积分球开口处的光谱辐亮度; $r_1$ 是积分球开口半径; $r_2$ 是探测器接收面的半径,或者在本文中指一个面积等于光谱辐射计在漫反射板上投影视场面积的圆的半径; $d$ 是积分球孔径到漫反射板的距离。

利用式(3)可以从积分球在距离  $d$  处的光谱辐照度计算出积分球开口处的光谱辐亮度,从而得到光谱辐射计的光谱辐亮度响应度(图 1(c))。为了验证公式(3)的正确性,仪器分别对距漫反射板 50, 100 cm 的积分球进行观测。在 250~340 nm 所选择的 12 个波长两次观测的比值为 3.812(12 个比值平均),标准偏差为 0.30%。计算比值为 3.820,比观测值大了 0.20%。

由于光谱辐射计在 spectralon 漫反射板上的

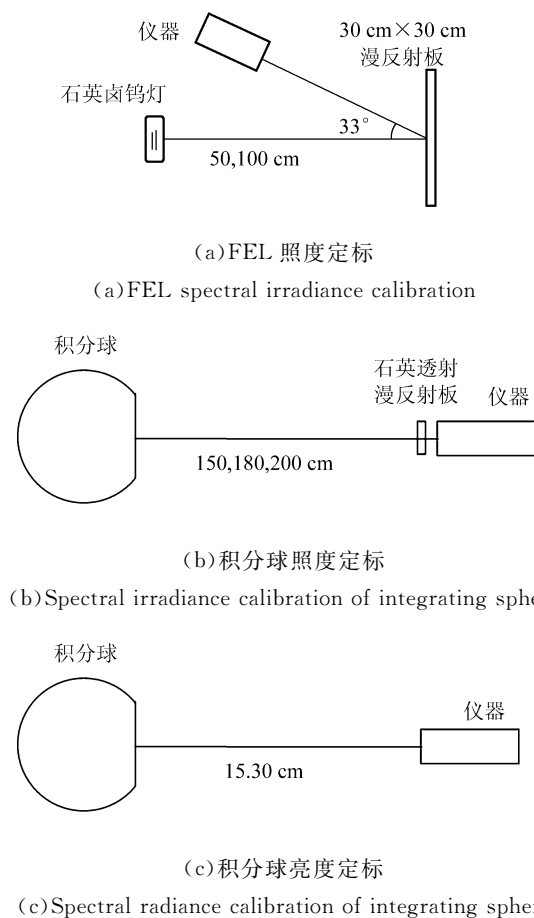


图 1 照度/亮度定标  
Fig. 1 Spectral irradiance/radiance calibration

投影视场较大,定标中就需要对照度进行修正,这就将引入额外的误差。若在靠近仪器的人瞳处放置透射漫反射板就可以将投影视场面积压缩得很小,这样修正系数的影响就微乎其微了。因此,将一块双面磨毛的熔石英薄片安放在光谱辐射计 2 cm x 3 cm 的入射孔径处用作透射漫反射板。同时应注意石英薄片距离光源(FEL 标准灯或积分球)的距离不能过近,因为透射漫反射板只对较小的张角有较好的余弦响应。

基于上述考虑,将 FEL 光谱辐照度标准灯在 50, 100 cm 的距离沿法线方向照明石英透射漫反射板(图 1(a)),以此确定出仪器+石英透射漫反射板系统的照度响应度。250~340 nm 12 个波长 2 次观测的比值为 3.991,标准偏差为 0.29%。计算比值为 3.997,比观测值大了 0.16%。图 1(b)积分球以共轴方式在 150, 180, 200 cm 的距离照明石英透射漫反射板,250~340 nm 12 个波

长 3 次观测的比值分别为 1.439 和 1.224, 标准偏差为 0.21% 和 0.29%。计算比值为 1.440 和 1.235, 比观测值分别大了 0.07% 和 0.03%。再根据式(3)计算出积分球开口处的亮度, 得到光谱辐射计的光谱辐亮度响应度(图 1(c))。

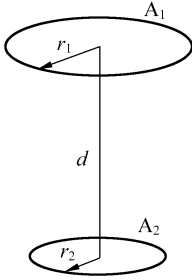


图 2 辐射换热角系数示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the radiation heat transfer goniometric factor

实际上, 式(3)就是利用两个共轴的圆形表面之间(见图 2)的辐射换热角系数公式来计算一定距离处的照度的一种近似。辐射换热角系数表示为<sup>[4]</sup>:

$$R_1 = \frac{r_1}{d}, R_2 = \frac{r_2}{d}, X = 1 + \frac{1 + R_2^2}{R_1^2}$$

$$F_{1-2} = 1/2 \times \left[ X - \sqrt{X^2 - 4 \times \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right], \quad (4)$$

由于  $A_1$  为一朗伯表面, 故辐通量  $\Phi_1 = \pi \times L_1 \times A_1$ , 对任意表面  $A_2$  而言, 入射辐通量  $\Phi_2 = E_2 \times A_2$ 。应用辐射换热角系数的定义, 得到  $F_{1-2} = \Phi_2 / \Phi_1$ , 因此有

$$E_2 / L_1 = F_{1-2} \cdot \pi \cdot A_1 / A_2, \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式, 得到

$$E_2 = 1/2 \times \left[ X - \sqrt{X^2 - 4 \times \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2} \right] \times \pi \times \frac{r_1^2}{r_2^2} \times L_1, \quad (6)$$

式(6)的简化形式就是公式(3), 在本文的情况下  $d = 50, 100 \text{ cm}$ ,  $r_1 = 10.16 \text{ cm}$ ,  $r_2 = 7.5 \text{ cm}$ , 使用公式(3)近似代替(6)式的误差分别小于 0.082% 和 0.0056%。因此使用此公式引起的误差比起试验设置的重复性等其他误差要小得很多了。几何因子  $G(d, r_1, r_2)$  其实就相当于式(1)中平面漫反射板 BRDF 的倒数。应该注意的是在确定光谱辐射计+漫反射板系统的照度响应度时, 仍然要根据式(1)和式(2)做出照度修正。

正确的应用 Walker 的技术的前提是积分球为朗伯辐射体, 制作良好的积分球在小心操作的情况下通常是满足这一条件的。为了考察 TX-20Z-UV 积分球系统输出的均匀性, 由硅探测器 and 中心波长为 350 nm 的滤光片所组成的辐射计测量了出射孔径的相对亮度。该辐射计视场约为  $5^\circ$ , 在积分球孔径上的投影为直径 3 cm 的圆。测量在与出射孔径相垂直的方向进行, 直径 20.32 cm 的开口上共测量了 20 个位置的相对亮度, 最大的偏差出现在左上角为 2.5%。图 3 所示为实测的单独由氙灯照明情况下该积分球出射孔径的均匀性, 可见 TX-20Z-UV 积分球系统的辐射特性是很接近朗伯辐射体的。

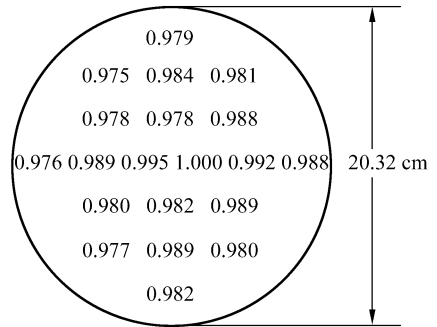


图 3 在 350 nm 处积分球出射孔径的均匀性(300 W 氙灯照明)

Fig. 3 Uniformity of the integrating sphere exit aperture plane at 350 nm (illuminated by a 300 W xenon lamp)

### 3 实验结果及分析

通过前文所述的积分球定标方法获得的紫外光谱辐射计的光谱辐亮度响应度见图 4, 数据如表 1 所示。还有几点是在利用积分球定标过程中必须要注意的。

在积分球亮度定标中, 最大的不确定度来源是石英卤钨灯光谱辐照度的相对不确定度。中国计量院标称的标准石英卤钨灯在 250 nm 的定标不确定度为 4%, 是应用积分球定标方法无法消除的。若要实现空间紫外光谱辐射计的高精度辐射定标(1~2%), 必须获得不确定度较小的光谱辐照度标准灯(比如美国标准技术研究院 NIST 的光谱辐照度标准石英卤钨灯在 250 nm 标定不确定度为 1.6%,  $k=2$ )。另外, 几何因子  $G(d, r_1, r_2)$  在积分球定标中是至关重要的参数, 因此

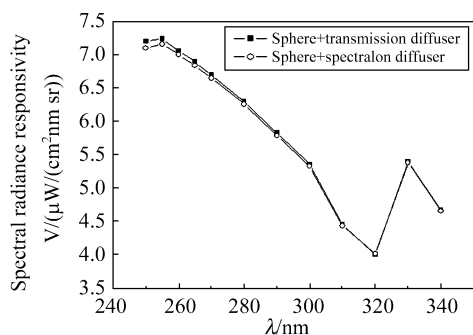


图 4 利用内部照明积分球的定标方法(石英透射漫反射板和 spectralon 漫反射板)获得的光谱辐射计辐亮度响应度

Fig. 4 Radiance responsivity of the spectroradiometer derived by internally illuminated integrating sphere (quartz transmission diffuser and spectralon diffuser).

距离的测量精度必须提高。本实验距离测量不确定度为~0.4%,若要求距离测量的影响在辐射定标中可以忽略,该不确定度必须达到~0.05%。

FEL 标准灯在 250~400 nm 照度值变化约两个量级,若要在探测器的同一高压状态测量就会引起 300 nm 以下探测系统信噪比较低,影响探测信号的准确性。为此在 250~340 nm(一般比较关心同时也难以准确测量的也是这个波长范围)选择 12 个波长,采用定波长多次测量平均(50 次)的办法不仅有效地消除了随机误差而且极大地缩短了测量时间,使噪声和探测系统线性及响应度漂移的影响最小化。

经验表明杂散光是不可忽视的定标误差来源,如果不采取限制措施将引起~10%的测量误差。为此将积分球、仪器、光学平台等可能反射光的表面均进行表面发黑处理,表面发射率约 0.8%,再经过适当的黑布遮光处理,就可以使杂散光的影响最小化至~0.3%。

积分球亮度输出应保持相当的稳定性,才不会给辐射标定结果带来影响,经对积分球开口亮度的实际监测发现亮度输出会有轻微的衰减~0.5% h<sup>-1</sup>,将积分球冷却到室温再打开氙灯照明,亮度会恢复到原来的数值。这应该是氙灯系统本身的不稳定性(0.5% h<sup>-1</sup>)和由氙灯的强紫外辐射形成的臭氧的吸收所造成的。由于标定过程所耗费的时间较短~30 分钟,故积分球亮度输出的稳定性对定标带来的不确定度为~0.5%。

表 1 应用积分球定标方法获得的仪器光谱辐亮度响应度数据

Tab.1 Spectral radiance responsivity of instrument derived by integrating sphere

波长 nm	积分球+石英透射漫反射板 亮度响应度	积分球+spectralon 漫反射板 亮度响应度	响应度比值 (石英/spectralon)
	V/(μW / (cm <sup>2</sup> nm sr))	V/(μW / (cm <sup>2</sup> nm sr))	
250	7.19	7.09	1.014
255	7.23	7.15	1.010
260	7.05	6.99	1.009
265	6.88	6.83	1.007
270	6.69	6.64	1.008
280	6.29	6.25	1.007
290	5.82	5.78	1.005
300	5.35	5.32	1.006
310	4.45	4.43	1.003
320	4.00	4.01	0.999
330	5.39	5.37	1.005
340	4.66	4.65	1.002

从表 1 中可以看出,采用两种漫反射板的积分球定标方法所获得的仪器辐亮度响应度是在 1%以内相一致的;为了便于比较,在同样的操作条件下使用了同一支 FEL 标准灯。这两种定标方法的偏差主要是由于在 spectralon 漫反射板照度传递时省略了修正因子同时假设 FEL 标准灯为均匀亮度源造成的,这也是应用两种漫反射板进行积分球定标的原因所在。

为了验证定标的重复性,分别在 2005 年 04 月 06 日、2005 年 04 月 13 日和 2005 年 04 月 20 日 3 次标定仪器的光谱辐亮度响应度。积分球+石英透射漫反射板定标亮度响应度 3 次的比值(与平均值的比)分别为 1.001 1, 0.999 3 和 0.999 7。积分球+spectralon 漫反射板定标三次的比值(与平均值的比)分别为 0.997 4, 1.001 1 和 1.001 6。

### 4 结 论

本文论述了基于内部照明的积分球的辐亮度定标方法,并应用该方法标定了空间紫外遥感光谱辐射计 250~340 nm 的光谱辐亮度。初步的数据分析显示积分球定标最大的不确定度来源是

石英卤钨灯光谱辐照度的相对不确定度。为了实现空间紫外遥感光谱辐射计高精度的辐射标定(1%~2%)必须获得相对不确定度较小的光谱辐照度标准灯,如 NIST 的 FEL 标准灯(250 nm 不确定度为 1.6%)。同时,spectralon 漫反射板的

双向反射率 BRDF 也要实现高精度测量,以便通过实验来比较积分球定标和 spectralon 平面漫反射板定标两种方法的优缺点,检验源自不同方法的仪器光谱辐亮度响应度的一致程度。

#### 参考文献:

- [1] WALKER J H,CROMER C L. A Technique for improving the calibration of large-area sphere sources[J]. *SPIE*, 1991, 1493: 224-230.
- [2] HEATH D F, WEI ZH Y. Comparison of spectral radiance calibrations of SBUV-2 satellite ozone monitoring instruments using integrating sphere and flat-plate diffuser techniques[J]. *Metrologia*, 1993, 30: 259-264.
- [3] HEATH D F. Large aperture spectral radiance calibration source for ultraviolet remote sensing instruments[J]. *SPIE*, 2003, 4891: 335-342.
- [4] 车念曾, 闫达远. 辐射度学与光度学[M]. 北京理工大学出版社, 1990.  
CHE N Z, YAN D Y. *Radiometry and photometry*[M]. The publishing board of Beijing University of Science and Technology, 1990. (in Chinese)

**作者简介:**王淑荣(1961—),女,吉林长春人,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室研究员,主要从事紫外-真空紫外遥感仪器方面的研究。

邢进(1979—),男,辽宁鞍山人,现为中科院长春光机所应用光学国家重点实验室在读博士研究生,主要从事短波光学方面的研究。Email: xingjin980530@yahoo.com.cn