

文章编号:1002-2082(2020)06-1236-05

# 大口径积分球光源绝对辐射定标技术研究

袁林光, 占春连, 卢 飞, 范纪红, 李 燕, 吴李鹏, 尤 越

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**为了实现大口径积分球光源高精度绝对辐射定标, 研究了基于钨带灯比对的光谱辐射亮度定标方法, 通过同心圆扫描分析了空间光谱辐射均匀性定标方法, 研制了绝对辐射定标装置, 校准了出光口径为Φ300 mm 积分球光源的光谱辐射亮度、亮度、色温值, 实验验证光谱辐射亮度绝对定标的不确定度优于4%。

**关键词:**积分球光源; 辐射定标; 光谱辐射亮度; 色温

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0603003

## Absolute radiometric calibration technique of large aperture integrating sphere source

YUAN Linguang, ZHAN Chunlian, LU Fei, FAN Jihong, LI Yan, WU Lipeng, YOU Yue

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to realize high accuracy absolute radiometric calibration of large aperture integrating sphere source, the spectral radiance calibration method based on tungsten strip lamp was studied, then the spectral radiation uniformity calibration method through concentric scanning was discussed. An absolute radiometric calibration device was developed on this basis. The spectral radiance, luminance and color temperature of the integrated sphere source with the opening diameter of Φ300 mm were calibrated. The results of experiment prove that the uncertainty of spectral radiance absolute calibration is less than 4%.

**Key words:** integrating sphere source; radiometric calibration; spectral radiance; color temperature

## 引言

积分球光源作为光辐射计量测试领域的重要设备, 提供了1个均匀漫射扩展光源, 主要用于光度/辐射度测量仪器、光谱仪以及CCD成像系统校准, 通常由积分球、内置或外置光源和通电系统组成<sup>[1-5]</sup>。按照使用波段及色温要求, 光源通常选用卤钨灯、LED灯或氘灯<sup>[6-8]</sup>。积分球内壁喷涂聚四氟乙烯、硫酸钡等白色漫反射材料, 也可采用镀铝、镀金的设计<sup>[9-11]</sup>。

目前国内相关计量测试机构在积分球光源中心点光谱辐射亮度、辐射均匀性、余弦特性和稳定性等参数测试定标方面做了部分研究工作, 研制了积分球辐射性能测试装置<sup>[12-13]</sup>。随着出光口径为Φ500 mm 的积分球光源在CCD型光谱辐射度计及成像光谱仪的校准测试中得到广泛应用, 对

高精度绝对光谱辐射定标提出迫切需求<sup>[14-15]</sup>。

采用基于标准光源的比对法和同心圆扫描法研究了大口径积分球光源光谱辐射亮度、亮度、色温等参数的绝对辐射定标方法, 研建了绝对辐射定标装置, 对实验室现有直径1 m、出光口径Φ300 mm 的积分球光源进行了校准, 并分析评估了测量不确定度。

## 1 绝对辐射定标方法

### 1.1 光谱辐射亮度定标方法

1) 采用基于标准光源的比对法完成积分球光源出光口中心点位置光谱辐射亮度的定标。

在光学暗室环境下光源发出的光辐射经输入光学系统入射到分光系统入射狭缝, 从分光系统出射狭缝输出的单色光经输出光学系统后入射到

收稿日期: 2020-03-13; 修回日期: 2020-04-15

基金项目: 国防科技工业局技术基础项目

作者简介: 袁林光 (1990-), 男, 硕士, 主要从事光谱光度与辐射度计量测试技术方面的研究。E-mail: 1781985108@qq.com

探测器敏感面。

当测量光谱辐射亮度标准灯时, 探测器的输出信号  $i_s(\lambda)$  为

$$i_s(\lambda) = L_s(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \eta(\lambda) + i_0(\lambda) \quad (1)$$

式中:  $L_s(\lambda)$  为光谱辐射亮度标准灯的光谱辐射亮度;  $\rho(\lambda)$  为输入、输出光学系统的光谱反射率;  $F(\lambda)$  为系统的传递函数;  $R(\lambda)$  为探测器的光谱响应度;  $\eta(\lambda)$  为分光系统衍射效率;  $i_0(\lambda)$  为背景信号。

在相同条件下, 光谱辐射亮度标准灯移出光路, 调节积分球光源使其出光口中心点位置清晰成像在分光系统入射狭缝, 探测器的输出的信号为

$$i_t(\lambda) = L_t(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \eta(\lambda) + i_0(\lambda) \quad (2)$$

式中:  $L_t(\lambda)$  为积分球光源出光口中心点位置的光谱辐射亮度。

比较上边两式, 整理后得:

$$L_t(\lambda) = \frac{i_t(\lambda) - i_0(\lambda)}{i_s(\lambda) - i_0(\lambda)} \cdot L_s(\lambda) \quad (3)$$

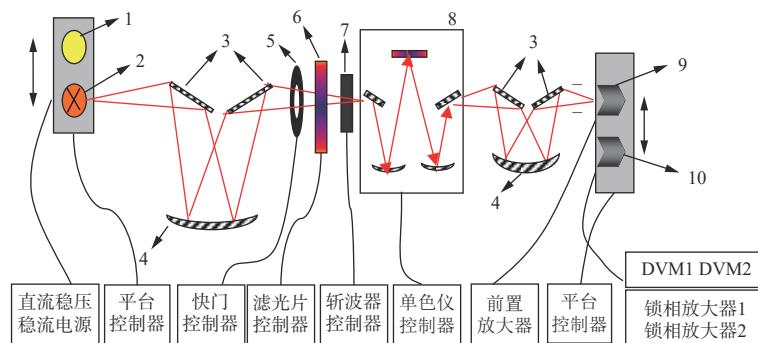
由式(3)可知, 由光谱辐射亮度标准灯的光谱辐射亮度值, 便可获得待测积分球光源出光口中心点的光谱辐射亮度  $L_t(\lambda)$ 。

### 2) 积分球光源出光口空间均匀性定标。

采用“同心圆扫描法”按设定的半径步进  $\Delta r$  和角度步进  $\Delta\theta$  在被标定积分球光源的出光口平面进行扫描, 每扫描到一个位置, 计算机采集系统读取一组等光谱间隔的输出信号  $V(\Delta r, \Delta\theta, \lambda)$ 。则被标积分球光源光谱辐射均匀性为出光口空间任一位置点  $V(\Delta r, \Delta\theta, \lambda)$  的信号与积分球光源出光口中心点输出信号  $V_0(0, 0, \lambda)$  之比:

$$\mu(\Delta r, \Delta\theta, \lambda) = \frac{V(\Delta r, \Delta\theta, \lambda)}{V_0(0, 0, \lambda)} \cdot 100\% \quad (4)$$

### 3) 计算大口径积分球光源出光口空间各个点



1. 积分球光源; 2. 光谱辐射亮度标准光源; 3. 平面反射镜; 4. 球面反射镜; 5. 电控快门;  
6. 滤光片; 7. 斩波器; 8. 单色仪; 9. Si 探测器; 10. InGaSn 探测器

图 1 光谱辐射亮度定标装置

Fig. 1 Spectral radiance absolute calibration device

标准光源系统包括一组钨带灯、稳压稳流电源及一维移动平台等, 其中, 钨带灯提供可见到近

的光谱辐射亮度为

$$L(\Delta r, \Delta\theta, \lambda) = L_t(\lambda) \cdot \mu(\Delta r, \Delta\theta, \lambda) \quad (5)$$

### 1.2 光亮度复现方法

当积分球光源的光谱辐射亮度已知后, 根据光度学和辐射度学理论, 可通过(6)式计算得到被测积分球光源的光亮度  $L$  为

$$L = k_m \int_{380}^{780} L(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

式中:  $k_m$  为最大光谱光视效能值;  $V(\lambda)$  为视觉函数。

### 1.3 色坐标、色温定标方法

由积分球光源的光谱辐射亮度分布, 按照 1931CIE xy 色度系系统计算积分球光源的三刺激值, 得到积分球光源的色坐标, 由(7)式计算得到色温值为

$$T = 669A^4 - 779A^3 + 3660A^2 - 7047A + 5652 \quad (7)$$

式中:  $A = \frac{x - 0.329}{y - 0.187}$ ;  $x, y$  为色坐标值。

## 2 绝对辐射定标装置

大口径积分球光源绝对辐射定标装置由两部分组成: 光谱辐射亮度定标装置, 实现积分球光源出光口中心点位置光谱辐射亮度定标; 出光口光谱辐射均匀性定标装置, 实现积分球光源出光口平面光谱辐射均匀性定标。然后由中心点光谱辐射亮度值和光谱辐射均匀性定标结果计算得到积分球出光口不同位置处光谱辐射亮度、光亮度、色温。

### 2.1 光谱辐射亮度定标装置

光谱辐射亮度定标装置采用基于标准光源的比对法, 由标准光源系统、输入光学系统、分光系统、输出光学系统、探测及数据采集系统和综合型测量软件等组成, 如图 1 所示。

红外标准光谱辐射亮度量值, 一维移动平台用于切换标准光源与被测积分球光源; 输入光学系统

与输出光学系统类似,均由一组平面镜和球面镜等组成,输入光学系统将光源以 1:1 成像在单色仪的入缝处,而输出光学系统则将单色仪出缝清晰成像在探测器的接收面上;分光系统包括一组滤光片、单色仪、电动快门、斩波器及各自的控制器等,光源辐射信号经过分光系统后由连续的光谱信号变成一组离散的单色光谱信号;探测及数据采集系统主要包括 Si 探测器、InGaAs 探测器、前置放大器、锁相放大器、数字电压表及用于安装和调试的一维精密平台等,覆盖 300 nm~2 000 nm 波段,完成光电转换并进行电信号放大。

## 2.2 出光口光谱辐射均匀性定标装置

出光口光谱辐射均匀性定标装置由多维电控精密旋转平台、瞬态光谱仪、激光调节器及计算机采集、处理与控制系统等组成。

如图 2 所示,多维电控精密旋转平台设计为在  $\Phi 300$  mm 电控旋转台上加载行程为 280 mm 的一维扫描平台的方法来实现积分球光源辐射平面的“同心圆”扫描。其中扫描半径为 280 mm,直径达到 560 mm,可以完全覆盖积分球光源的口径范围。瞬态光谱仪是实现积分球光源光谱辐射信号快速准确测量的关键设备,由入射光纤、光纤耦合器、狭缝、准直镜、衍射光栅、聚焦镜、面阵探测器和数据采集系统组成,其中光纤输入端固定在多维电控精密旋转平台的一维平移台滑块中心位置,用于接收被标定积分球光源辐射平面不同位置处的光辐射信号。激光调节器用于激光二维定位,确定基准面使扫描平面与积分球光源辐射平面平行。计算机信号采集、处理与控制系统分别与电移台控制器、瞬态光谱仪器相连,计算被标定积分球光谱辐射均匀性,显示定标结果。

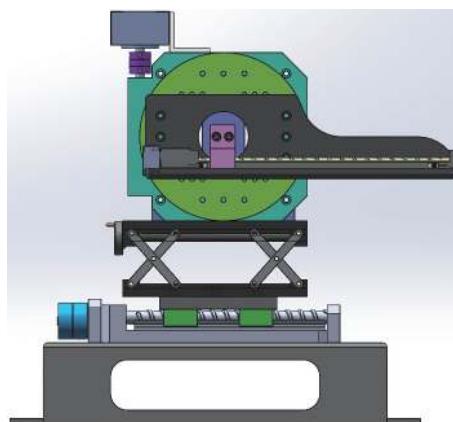


图 2 光谱辐射均匀性定标装置

Fig. 2 Spectral radiation uniformity calibration device

## 3 实验结果及测量不确定度分析

### 3.1 实验结果

对图 3 所示直径 1 m、出光口径  $\Phi 300$  mm 的大口径积分球光源进行绝对辐射定标,表 1 为光源出光口中心点位置在波长范围为 300 nm~2 000 nm 的光谱辐射亮度定标结果代入(6)式和(7)式计算可得可见光波段,光亮度值为  $3.403 \times 10^3 \text{ cd/m}^2$ , 色温值为 2854 K。



图 3 大口径积分球光源实物图(拍摄加灯照明情况下的实物照片)

Fig. 3 Physical picture of large aperture integrating sphere source

表 1 积分球光源光谱辐射亮度绝对定标结果

Table 1 Spectral radiance absolute calibration results of integrating sphere source

| 波长/<br>nm | 光谱辐射亮度/<br>( $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$ ) | 波长/<br>nm | 光谱辐射亮度/<br>( $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$ ) |
|-----------|--|-----------|--|
| 300       | 9.30   | 900       | 1403.71  |
| 325       | 25.11  | 950       | 1353.00  |
| 350       | 51.59  | 1000      | 1345.13  |
| 375       | 91.37  | 1050      | 1300.12  |
| 380       | 92.26  | 1100      | 1129.23  |
| 390       | 99.93  | 1200      | 918.47   |
| 400       | 109.92   | 1300      | 811.03   |
| 450       | 165.27   | 1400      | 625.06   |
| 500       | 266.86   | 1550      | 514.15   |
| 550       | 414.97   | 1700      | 465.91   |
| 600       | 593.01   | 1800      | 424.36   |
| 656       | 796.76   | 1850      | 447.03   |
| 700       | 882.44   | 1900      | 371.86   |
| 800       | 1274.61  | 1950      | 353.66   |
| 850       | 1370.99  | 2000      | 363.22   |

图 4 为光源出光口典型波长点(从左往右依次为波长 300 nm、650 nm、2 000 nm)光谱辐射空间

均匀性定标结果,可以看出积分球中心区域空间均匀性优于边缘区域,在紫外波段由于卤素灯的光谱辐射亮度数值很小和积分球涂层喷涂引起的光谱反射率变化,空间均匀性差于可见和近红外波段。

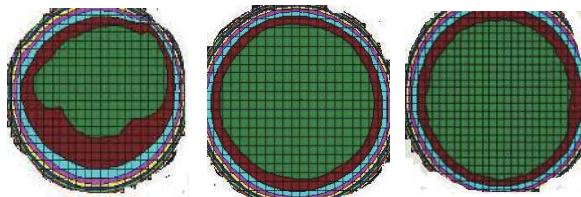


图 4 光谱辐射空间均匀性定标结果

**Fig. 4 Calibration results of spatial uniformity of spectral radiation**

### 3.2 测量不确定度分析

大口径积分球光源出光口平面光谱辐射亮度定标不确定度分析详见表 2。其中光谱辐射亮度标准灯的光谱辐射亮度、分光系统波长和探测系统非线性测量不确定度由校准证书得到;空间光谱辐射均匀性测量不确定度影响因素主要包括多维电控精密旋转平台调整机构、瞬态光谱仪光谱辐射测量非线性和环境杂散光等,实验测量评估优于 1.2%;经过大量的实验得到测量重复性引入的测量不确定度均优于 1.0%。

表 2 光谱辐射亮度定标测量不确定度分析

**Table 2 Measurement uncertainty analysis of spectral radiance calibration**

| 不确定度分量            | 标准不确定度% |
|-------------------|---------|
| 光谱辐射亮度标准灯 $u_1$   | 1.3     |
| 分光系统波长 $u_2$      | 0.6     |
| 探测系统非线性 $u_3$     | 0.3     |
| 环境杂散光 $u_4$       | 0.6     |
| 空间光谱辐射均匀性 $u_5$   | 1.2     |
| 测量重复性 $u_6$       | 1.0     |
| 相对合成标准不确定度        | 2.0     |
| 相对扩展不确定度( $k=2$ ) | 4       |

综合各项测量不确定度分量的贡献,使用大口径积分球光源绝对辐射定标技术进行出光口平面的光谱辐射亮度定标不确定度优于 4%。

## 4 结论

研制了大口径积分球光源绝对辐射定标装置,采用以光谱辐射亮度标准灯为基础的比对法实现光源出光口中心点位置光谱辐射亮度标定;

通过同心圆扫描得到出光口空间光谱辐射均匀性,在此基础上实现光源出光口不同位置处光谱辐射亮度、光亮度、色温的高精度定标,实验室测量了出光口径  $\Phi 300\text{ mm}$  的积分球光源,其光谱辐射亮度测量不确定度为 4%。该辐射定标装置具有光谱范围宽、测量精度高等特点,不仅适用于各类积分球光源光谱辐射亮度的测试,对大口径近紫外到近红外目标模拟器的计量测试也具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] WANG Xiaoxu. Study on new types of spectral radiance calibration source[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.  
王晓旭. 新型光谱辐射亮度定标光源研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [2] ZHENG Kezhe. Optical metrology[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002.  
郑克哲. 光学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [3] DU Chuanyao, ZHANG Chunbo, MA Jingjin, et al. Integrating sphere calibration of CCD linear and surface uniformity[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014(6): 54-57.  
杜传耀, 张春波, 马京津, 等. 利用积分球对CCD线性和面均匀性的标定[J]. 计测技术, 2014(6): 54-57.
- [4] JIA Hui, LI Futian. Analysis of factors affecting spectral radiance calibration by applying a diffuse plane[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 383-387.  
贾辉, 李福田. 影响光谱辐射亮度标定因素的分析[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 383-387.
- [5] LIU Hui, CHEN Hongyao, LI Jiawei, et al. Large dynamic range radiation standard transmission research based on integrating sphere source[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 243-250.  
刘辉, 陈洪耀, 李佳伟, 等. 基于积分球光源的大动态范围辐射标准传递技术研究[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 243-250.
- [6] YUE Zhige, LIU Fu, ZHAO Guijun, et al. Integrating sphere design built-in LED calibration light source[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(4): 52-55.  
岳智革, 刘福, 赵贵军, 等. 内置LED定标光源的积分球设计[J]. 光学与光电子技术, 2014, 12(4): 52-55.
- [7] FANG Chenyan, HUANG Xiaoxian, YIN Dayi. The influence of light source's fluctuation of xenon lamp integrating sphere on ultraviolet system calibration[J]. Opto-

- Electronic Engineering, 2016, 43(9): 20-25.  
房陈岩, 黄小仙, 尹达一. 氙灯积分球光源起伏对紫外系统定标影响[J]. 光电工程, 2016, 43(9): 20-25.
- [8] LI An. Study on radiometric calibrations based on color-temperature automatically adjustable integrating sphere light source[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009.  
李安. 基于等色温自动调光积分球光源的辐射定标研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [9] SUN Jingxu, ZHANG Hanzhuang. Thermal design for a kind of high-light-level integrating sphere calibration source[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 129-135.  
孙景旭, 张汉壮. 一种高亮度积分球定标光源的热设计[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 129-135.
- [10] ZHANG Mengya, YUAN Yinlin, ZHAI Wenchao, et al. Design and test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 180-189.  
张梦雅, 袁银麟, 翟文超, 等. 宽动态范围红外积分球辐射源的设计与检测[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 180-189.
- [11] YUAN Yinlin, XU Jun, ZHAI Wenchao, et al. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 211-218.  
袁银麟, 徐骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 211-218.
- [12] YE Zhao, REN Jianwei, LI Baoyong, et al. The radiation testing research of radiometric calibration source of the large aperture integrating sphere[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2012, 32(3): 39-44.  
叶钊, 任建伟, 李葆勇, 等. 大口径积分球辐射定标光源辐射性能研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(3): 39-44.
- [13] HE Yingwei, LI Ping, WU Houping, et al. Output irradiance uniformity of integrating sphere source[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 548-553.  
赫英威, 李平, 吴厚平, 等. 积分球辐射光源照度均匀性研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 548-553.
- [14] KANG Qing, YUAN Yinlin, WENG Jianwen, et al. System-level polarized calibration methods in laboratory of directional polarization camera[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2019, 14(1): 36-48.  
康晴, 袁银麟, 翁建文, 等. 多角度偏振成像仪系统级偏振定标方法研究[J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(1): 36-48.
- [15] FAN Jihong, ZHAO Shenglu, ZHAN Chunlian, et al. Absolute radiometric calibration technique of imaging spectrometer[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(4): 629-632.  
范纪红, 赵生禄, 占春连, 等. 成像光谱仪绝对辐射定标技术研究[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 629-632.