

文章编号: 1007-5461(2001)05-0424-05

## 大孔径积分球辐射源光谱辐射特性测试方法研究

章骏平, 吴浩宇, 周威, 郑小兵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘 要** 本文系统地介绍了积分球辐射源的光谱辐射特性的测试方法。通过实验测量了一内径为 1200 mm, 出光面直径为 200 mm 的积分球辐射源在 350~2500 nm 波段内的绝对光谱辐亮度, 分析了测量不确定度, 并对系统的稳定性、出光面的平面和角度辐射均匀性、各亮阶之间的线性等辐射特性做了定量评估。

**关键词** 积分球; 光谱辐射特性**中图分类号**: O433.1, O434.12 **文献标识码** A

## 1 引 言

积分球辐射源是各类光学辐射测量仪器、特别是大口径成像光谱仪器辐射定标的主要设备。积分球是一个内壁均匀喷涂高反射率漫射材料(如聚四氟乙烯、硫酸钡等)并内置多个小体积光源的球形腔体。在利用积分球辐射源进行辐射定标工作时, 可通过改变内部点亮的灯的个数来调节其辐射输出, 我们以亮阶来表示积分球辐射源可调的辐亮度等级。由于积分球内壁漫反射涂层的“积分”作用, 理论上我们可以在积分球出光面任一位置获得均匀的朗伯辐射, 且通过点亮灯个数来调节亮阶, 并能保持色温不变。实际上, 积分球辐射源本身构造涉及众多的技术环节, 而其能称为辐射定标源的关键是对光谱辐射性能的实验评价和完备的标准传递功能。评价积分球辐射源的技术指标主要有绝对光谱辐亮度、系统稳定性、出光面平面和角度辐射均匀性以及各亮阶的线性等。

作者检测的积分球辐射定标源内径为 1200 mm, 内壁喷涂硫酸钡漫反射材料, 出光面直径为 200 mm, 内置 8 只溴钨灯(由两台稳定度优于 0.05% 的直流稳流源供电)。本文就积分球辐射源光谱辐射特性检测的方法、装置、实验过程、数据处理及误差分析等进行了较系统地介绍。

## 2 测试方法和装置

## 2.1 光谱辐亮度

积分球辐射源光谱辐亮度参数的确定实际上是一个标准传递过程。常用的标准传递方式是“标准灯-漫反射标准板法”, 即利用标准灯照射漫反射标准板, 再由光谱辐射计交替测量漫反射标准板的辐射亮度和积分球辐射源的输出, 通过比对处理完成标准传递。该方法涉及了两个标准值的引用, 再加上漫反射标准板非理想朗伯性以及几何条件的控制等误差因素, 这就确定了该方法的传递误差是较大的。为减少中间环节的影响(如漫反射标准板的反射率值), 我们发展了“标准灯-传递积分球法”, 其测试原理如图 1 所示。它是通过一个体积相对较小的传递积分球将标准灯的入射通量与被测积分球的

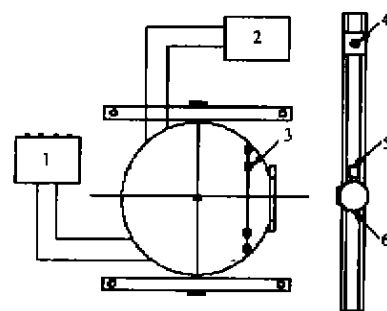


Fig.1 The diagram of measurement of radiance  
1. power-supply, 2. water-cooled, 3. bromine-tungsten lamp, 4. standard-lamp, 5. spectral radiometer, 6. transfer integrating-sphere

收稿日期: 2000-05-29; 修改日期: 2000-07-13

入射通量加以比较实现标准传递的。传递积分球开有两个口, 一个是入射光开口, 另一个是与其垂直方向连接光谱辐射计的开口。测试时先将传递积分球的入光口对准标准灯, 记录此时光谱辐射计的数据, 再将传递积分球的入光口转向被测积分球, 调整好位置后同样记下辐射计的数据。由上述简要说明可以知道, 传递积分球的光谱物理参数将不参与标准传递 (仅需要精确知道入光孔几何参数), 从而达到了减少中间环节影响的目的。

设标准照度灯的辐照度为  $E$ , 被测积分球出光面和传递积分球入光口的面积分别是  $S$  和  $S'$ , 中心距离是  $L$ , 光谱辐射计对标准灯和被测积分球的读数是  $DN$  和  $DN'$ , 辐射源的辐亮度是  $B$ , 则有以下等式:

$$\frac{DN(\lambda)}{DN'(\lambda)} = \frac{E(\lambda) \cdot S'}{B(\lambda) \cdot \Omega \cdot S'} = \frac{E(\lambda)}{B(\lambda) \cdot \Omega} \quad (1)$$

其中  $\Omega$  是被测积分球口对传递积分球口的立体角:

$$\Omega = \frac{S}{L^2} = \frac{\pi \cdot R^2}{L^2} \quad (2)$$

$R$  是被测积分球的出光口半径, 因此有:

$$B(\lambda) = \frac{DN(\lambda)}{DN'(\lambda)} \cdot \frac{E(\lambda) \cdot L^2}{\pi \cdot R^2} \quad (3)$$

实际计算中需要的数据是:  $DN$ ,  $DN'$ ,  $E$ ,  $L$  和  $R$ 。  $DN$ ,  $DN'$  由光谱辐射计测出;  $L$  和  $R$  由几何测量得到;  $E$  是标准灯的绝对光谱辐照度, 通过与计量院工作标准比对得到。测试中我们使用的光谱辐射计是美国 ASD 公司的 FR 型野外光谱辐射计, 它的波段范围是 350~2500 nm。在 350~1000 nm、1000~1800 nm、1800~2500 nm 分别使用 3 个探测器, 光谱分辨分别为 3 nm、10 nm、10 nm。使用的传递积分球内径是 120 mm, 入光口直径是 37 mm, 内壁反射层由聚四氟乙烯粉末压制而成。

## 2.2 系统稳定性

系统稳定性利用硅光电二极管陷阱探测器 (Trap) 进行监测。硅光电二极管陷阱探测器是我们自行研制的一种光谱绝对响应率传递标准, 其稳定性和对于单色光的绝对测量精度均优于 0.05%。由于目前我们的硅光电二极管陷阱探测器还未完成单色光检测的系列工作, 所以仅利用稳定性指标进行应用。硅探测器的响应波段约为 350~1100 nm, 对积分球辐射源稳定性的监测须假设系统在 350~1100 nm 的辐射总量变化与在被检波段即 350~2500 nm 的辐射总量变化趋势相同。显然, 在积分球工作状态不变的情况下, 这种假设是合理的。在下面的几项特性测试中, 我们同样应用了该假设。在稳定性检测时, 先确定测试时间 (如 3 小时), 然后调节 Trap 的位置使其入瞳中心与被测积分球出光面中心同轴。充分预热后定时采样 (如 3 分钟采集一次), 即可通过分析 Trap 的测量值了解光源在这一阶段辐射量的变化情况。

## 2.3 出光面平面辐射均匀性

出光面平面辐射均匀性是指积分球出光面的光谱辐射均匀程度。测试时, 我们将 Trap 探测器固定到一个两维平移的导轨上, 调整 Trap 的入光轴与被测积分球出光面垂直, 然后将出光面等间隔划分, 移动探测器的位置并采集数据即可测得不同点的光谱辐射值。Trap 的入瞳与积分球出光面重合且视场很小, 以保证其视场仅覆盖采样面元。

## 2.4 出光面角度辐射均匀性

将 Trap 探测器置于与积分球发光面平行的导轨上, 调节探测器使其视场中心与发光面的中心重合, 移动并旋转探测器, 并记录探测器的偏转角并采集数据即可得到不同观测角的辐射输出值。

## 2.5 线性

被检积分球辐射源内设置 8 个 250 W 的石英溴钨灯, 使用积分球定标仪器时, 可以根据实际需要调节所需的亮阶。通常我们希望不同亮阶的光谱辐射输出成线性关系而简化定标结果的处理。实际上积分球内置光源由于其本身和所处的位置等决定积分球辐射源各亮阶之间很难形成理想的线性关系。事实上, 线性检测的目的是确定各个亮阶的比例关系, 而简化对各个亮阶进行辐射亮度的标准传递实验过程。测试时, 固定好 Trap 的位置使发光面充满其视场, 改变工作灯的个数并测试, 即可得到不同亮阶之间的光谱辐射关系。

### 3 测试结果及不确定度分析

#### 3.1 光谱辐亮度

该积分球辐射源的绝对光谱辐射亮度检测结果如表 1 所列, 由公式 (3) 可知辐亮度  $B$  的不确定度来自于  $DN$ 、 $DN'$ 、 $E$ 、 $L$  和  $R$  的测量误差, 其中  $E$  是由国家计量院提供标准值, 并给出分谱不确定度;  $L$  和  $R$  的不确定度来自于几何测量;  $DN$ 、 $DN'$  引进的不确定度由光谱仪器波长偏差、稳定性等方面引入, 根据综合不确定度的国际通用算法, 每个因素的不确定度均取为多次测量的均值标准偏差, 总不确定度由下式计算:

$$U_B^2 = \left(\frac{\partial B}{\partial DN}\right)^2 \cdot U_{DN}^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial DN'}\right)^2 \cdot U_{DN'}^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial E}\right)^2 \cdot U_E^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial L}\right)^2 \cdot U_L^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial R}\right)^2 \cdot U_R^2. \quad (4)$$

表 1 积分球绝对光谱辐亮度及综合不确定度 (8 只灯)

波长 (nm)	辐亮度值 ( $W/cm^2 \cdot Sr \cdot nm$ )	不确定度 (%)	波长 (nm)	辐亮度值 ( $W/cm^2 \cdot Sr \cdot nm$ )	不确定度 (%)
400	7.44E-7	4.4	1150	1.49E-5	4.5
450	1.97E-6	4.3	1200	1.40E-5	4.1
500	3.87E-6	4.3	1300	1.23E-5	4.3
555	6.70E-6	4.0	1540	7.35E-6	4.5
600	9.11E-6	3.9	1600	6.87E-6	4.4
650	1.15E-5	3.9	1700	5.88E-6	4.3
700	1.39E-5	4.0	2000	2.21E-6	4.6
750	1.49E-5	4.0	2100	1.89E-6	4.7
800	1.56E-5	4.1	2300	1.47E-6	4.7
900	1.61E-5	4.4	2400	1.18E-6	4.9
1050	1.63E-5	4.5	2500	8.40E-7	5.1

#### 3.2 系统稳定性

检测过程是在系统充分预热后, 以采样间隔 3 分钟, 连续测量约 3 小时, 结果显示最大偏差小于 0.3%, 均方差在 0.1% 左右, 图 2 为系统的稳定性曲线。

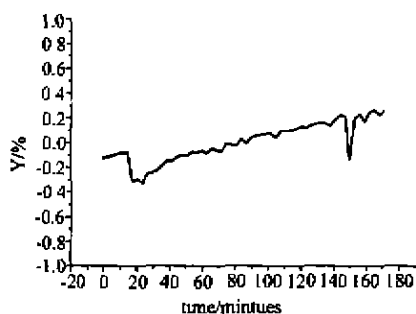


Fig.2 The system's stability

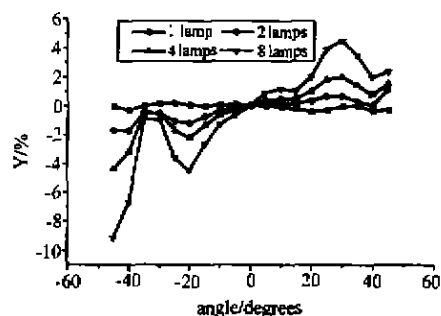


Fig.3 Angle property of different luminous grades

#### 3.3 出光面平面辐射均匀性

在对该发光面进行均匀性检测时, 先确定被测点的位置, 定义中心点坐标为 (0,0), 在  $\pm 9$  cm 范围内按 3 cm 间隔取点, 共有 37 个测量点, 实验结果表明: 随着辐亮度的减小, 面均匀性逐渐变好, 8、4、2、1 亮阶出光面各点光谱辐射量均方差分别为 1.3%、0.76%、0.45%、0.19%; 越远离中心变化就越大, 表 2 是一亮阶时发光面上各点与中心点比较的结果。

表 2 出光面光谱辐射均匀性参数表 (1 只灯)

Y 轴 \ X 轴	-3	-2	-1	0	1	2	3
3			-0.10	-0.26	-0.37		
2		-0.01	-0.09	0.11	0.13	0.12	
1	-0.30	-0.02	-0.04	0.06	0.07	0.07	-0.41
0	-0.24	-0.03	-0.01	0	<0.01	<0.01	-0.22
-1	-0.50	-0.10	-0.07	-0.07	-0.07	-0.08	-0.41
-2		-0.26	-0.15	-0.16	-0.16	-0.21	
-3			-0.50	-0.44	-0.50		

### 3.4 出光面角度辐射均匀性

图 3 显示的是积分球分别在四种亮阶状态的角度特性 (各转角与正入射时比较), 结果表明: 随着辐亮度的降低, 各角度的输出趋于一致, 而在第 8 亮阶时  $+45^\circ$  和  $-45^\circ$  的光谱辐射输出相差大于 10%。

### 3.5 线性

系统线性检测处理结果如表 3 所列, 处理时以辐射亮度标准传递亮阶——8 亮阶作为基点, 其它各亮阶线性按实测结果和基点的比值给出。

表 3 系统线性参数

亮阶数	8	7	6	5	4	3	2	1
输出值	4.1306	3.6477	3.1674	2.6719	2.2410	1.6449	1.0812	0.5237
线性	100%	88.31%	76.68%	64.69%	54.25%	39.82%	26.18%	12.68%

## 4 结 语

本文简要介绍了利用标准照度灯和传递积分球对积分球辐射源进行绝对辐亮度定标的方法, 并利用硅光电二极管陷阱探测器 (Trap) 对积分球系统的其它光谱辐射特性进行检测, 归纳检测结果中的问题主要有以下几点:

1) 积分球出光面平面和角度辐射均匀性检测结果较差, 如在第 8 亮阶时,  $+45^\circ$  度和  $-45^\circ$  度输出相差 10% 以上, 这说明我们在设计积分球辐射源时还要进一步改进方法;

2) 由线性检测结果可以看出, 各亮阶的辐射输出并不是按照点亮灯的个数变化, 这主要是由灯自身的差异引起的, 这就要求我们在使用不同亮阶时, 必须严格地按照线性定标时的工作状态, 而不是任意地点亮几只灯;

3) 光谱辐射亮度不确定度仍然受传递标准的限制, 应用具有精确分光构造的硅光电二极管陷阱等高精度标准探测器来直接探测并传递出积分球辐射源的输出是目前国际上光学计量及遥感辐射定标应用发展的前沿, 也是我们正在从事的研究工作。

## 参 考 文 献

- 1 肖毓龙. 遥感基础与试验 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991. 1: 45~60
- 2 李在清. 光谱光度测量与标准 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1993. 12: 110~160

- 3 周太民. 光源原理与设计 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993. 12: 342~351
- 4 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 7: 7~77
- 5 McLean J T, Guenther B W. Radiance calibration of spherical integrators [J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineer, *SPIE Proc.*, 1989, 9, 1109, 114~121

## Experimental Study of Spectral Radiance Characteristics of Large Aperture Integrating Sphere

Zhang Junping, Wu Haoyu, Zhou Wei, Zheng Xiaobing

( Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei 230031 )

**Abstract** Spectral radiant characteristics of integrating sphere was experimentally studied in this paper. Absolute spectral radiance and its uncertainty from an integrating sphere with 1200 mm inner diameter and 200 mm exit diameter were measured within 350~2500 nm. The stability, linearity, planar and angular radiant uniformity were characterized as well.

**Key words** integrating sphere; spectral radiant characteristics

章骏平 (1975. 3-), 男, 在读硕士. 1997年毕业于长春光学精密机械学院光电工程系, 毕业后从事高精度辐射基准建立和辐射定标方面的研究工作. 1999年7月参加“中国遥感卫星辐射校正场”敦煌、青海湖试验, 发表论文数篇.