

文章编号:1004-4213(2011)08-1127-5

# 积分球非中性对出射光谱的影响

卢利根<sup>a</sup>,张保洲<sup>a,b</sup>,张军远<sup>a</sup>

(北京师范大学 a. 天文系; b. 应用光学北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘 要:**从积分球非中性的角度出发,研究了光(辐射)经过积分球后的光谱性质变化. 根据积分球理论公式,推导了积分球光谱透过率的非中性与内壁涂层光谱反射比非中性的关系,证明积分球非中性通常大于内壁涂层非中性;且内壁涂层非中性一定时,涂层反射比越高,积分球非中性越大. 然后分别以 A 光源和氙灯作为入射光源,测量了硫酸钡和聚四氟乙烯两种典型涂层的积分球出射光的光谱分布、色坐标和色温. 结果表明,两种积分球的非中性对出射光谱的影响特征相同,表现在色度上是色坐标( $x, y$ )增大,色温降低. 其中聚四氟乙烯积分球非中性较小,其出射光色温在 A 光源、氙灯作为入射光源时分别降低约 20 K 和 70 K;而硫酸钡积分球的出射光色温则分别降低约 300 K 和 1 000 K,非中性影响明显.

**关键词:**积分球;非中性;光谱分布;色坐标;色温

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 3788/gzxb20114008. 1127

## 0 引言

积分球是光(辐射)度测量中的重要组件,一般用金属做成一个内部空心的球,内表面均匀喷涂一层具有朗伯漫射特性且光谱选择性小(即中性)、反射比较高的涂层. 根据不同的用途,积分球大体可以分为四类:光(辐射)通量测量积分球、反射透射测量积分球、均匀光源积分球和余弦校正积分球<sup>[1-6]</sup>. 前两种积分球应用中,通常采用相对测量方式,即光(辐射)度量的测量是通过与标准量(标准光源、标准板或未放置样品时的信号响应)的对比来获得的,由积分球所产生的光(辐射)性质变化对比前后大致相同而抵消. 而在后两种应用中,积分球作为光(辐射)传播过程中的一部分,所引起的某些附加光(辐射)性质变化会对一些仍把光源本身性质作为已知量的测量结果造成不可忽视的影响,积分球非中性就是这类应用中使用积分球实现匀光或余弦校正后应注意的一个问题.

所谓积分球非中性,是指积分球内壁涂层的光谱反射比或多或少地随波长变化,而积分球壁形成的均匀照度是入射光通过内壁的多次漫反射形成的,因此,光(辐射)通过积分球时将受到其非中性的影响而产生一定变化. 由于积分球在传统应用中更多是用于光(辐射)通量和反射透射测量,积分球非

中性可以忽略,因而在应用上未引起重视. 近年来随着积分球应用范围的扩大,尤其是积分球在要求特定色温(如 2 856 K)的均匀光源和余弦校正方面的应用,积分球非中性逐渐被提及,但对积分球非中性引起的影响却鲜有定性或定量讨论<sup>[1,7-8]</sup>.

本文通过积分球理论公式推导,给出了积分球光谱透过率的非中性与内壁涂层光谱反射比非中性的关系,证明在通常的积分球应用中,积分球非中性大于内壁涂层的非中性. 然后分别以 A 光源和氙灯作为入射光源,测量了常用的硫酸钡涂层和聚四氟乙烯涂层的两种积分球出射光的光谱分布、色坐标和色温,并与入射光比较,研究了两种积分球的非中性对出射光谱的影响.

## 1 积分球光谱透过率的非中性

根据积分球理论,由于积分球内壁涂层光谱反射比非中性的存在,积分球光谱透过率的非中性可以推导如下:

假设入射光谱辐通量为  $\Phi(\lambda)$ , 经内壁涂层多次漫反射之后,在出口处贴近内壁上的总光谱辐照度为<sup>[9-11]</sup>

$$E(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)\Phi(\lambda)}{4\pi R^2 [1 - \rho(\lambda)(1-f)]} \quad (1)$$

式中,  $\rho(\lambda)$  为积分球内壁涂层的光谱反射比;  $R$  为积

基金项目:国家自然科学基金(No. 10973005)资助

第一作者:卢利根(1986-),男,博士研究生,主要研究方向为光辐射计量及相关仪器. Email: arook@mail. bnu. edu. cn

导师(通讯作者):张保洲(1961-),男,教授,主要研究方向为光辐射探测技术. Email: zhangbz@bnu. edu. cn

收稿日期:2011-03-31;修回日期:2011-06-13

分球内球半径;  $f$  为积分球开口球面面积与积分球总的内反射表面积(包括开口)之比.

若假设  $\Phi(\lambda)$  为等能谱分布, 对式(1)微分后得

$$\frac{dE(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{1}{1-\rho(\lambda)(1-f)} \frac{d\rho(\lambda)}{\rho(\lambda)} \quad (2)$$

以  $\tau(\lambda)$  表示积分球的光谱透过率, 则有

$$\frac{d\tau(\lambda)}{\tau(\lambda)} = \frac{dE(\lambda)}{E(\lambda)} = \frac{1}{1-\rho(\lambda)(1-f)} \frac{d\rho(\lambda)}{\rho(\lambda)} \quad (3)$$

式中,  $d\rho(\lambda)/\rho(\lambda)$  表征积分球内壁涂层光谱反射比的非中性,  $d\tau(\lambda)/\tau(\lambda)$  表征积分球光谱透过率的非中性. 考虑到  $f \ll 1$ , 有

$$\frac{d\tau(\lambda)}{\tau(\lambda)} \approx \frac{1}{1-\rho(\lambda)} \frac{d\rho(\lambda)}{\rho(\lambda)} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 积分球光谱透过率的非中性与积分球内壁涂层光谱反射比的非中性正相关, 其系数  $1/(1-\rho(\lambda))$  在通常的积分球应用中都大于 1. 而且当内壁涂层光谱反射比的非中性相同时, 积分球光谱透过率的非中性将随着  $\rho(\lambda)$  的增大而迅速增大, 这也就是为什么在某些应用中积分球涂层不是越白(反射比高)越好的原因<sup>[7]</sup>. 以  $\rho(\lambda) \approx 0.9$  为例, 如果积分球内壁涂层光谱反射比的非中性为 2%, 那么根据式(4), 积分球光谱透过率的非中性将高达约 20%. 因此, 要减小积分球光谱透过率的非中性, 一方面应该选择光谱反射比尽量中性的材料作内壁涂层; 另一方面可以适当地减小  $\rho(\lambda)$ . 国际照明委员会 (Commission Internationale de L'Éclairage, CIE) 曾推荐积分球内壁涂层光谱反射比  $\rho(\lambda) \approx 0.8$ , 这在一定程度上能起到限制积分球多次漫反射对内壁涂层光谱反射比非中性的累积作用<sup>[1]</sup>.

## 2 积分球非中性与出射光谱变化

从式(4)可知, 尽管目前所使用的各种积分球涂层的光谱反射比非中性很小, 但在通常的积分球应用中, 由于涂层的反射比较高, 积分球非中性比涂层光谱反射比的非中性要大得多.

### 2.1 仪器和测量方法

为了研究积分球非中性对出射光谱的影响, 选取应用中最常见的硫酸钡 ( $\text{BaSO}_4$ ) 涂层和聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 涂层的两种积分球, 分别以 A 光源 (钨丝灯, 色温约 2 856 K) 和氙灯作为入射光源, 测量积分球入射光和积分球出射光的光谱分布、色坐标和色温. 仪器采用海洋光学的高灵敏度薄型背照式 CCD 光谱仪 (QE65000), 配置直径  $400 \mu\text{m}$  的石英光纤 (前端不加余弦校正器), 以辐亮度测量方式进行测量. 为了尽量减小其他因素对测量结果的影响, 整个过程分为仪器标定

和实验测量两个阶段, 严格遵守辐亮度测量规范和积分球使用规则, 实验布置示意图见图 1 和 2.

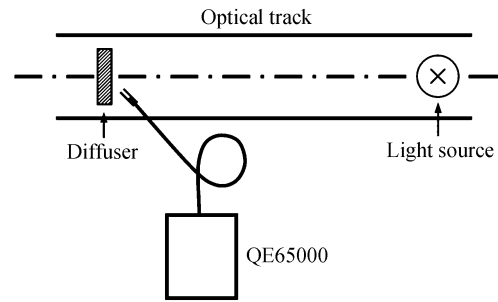


图 1 光谱仪标定实验布置和光源光谱分布测量  
Fig. 1 Schematic diagram of calibration experiment and measurement of spectral distribution of the light source

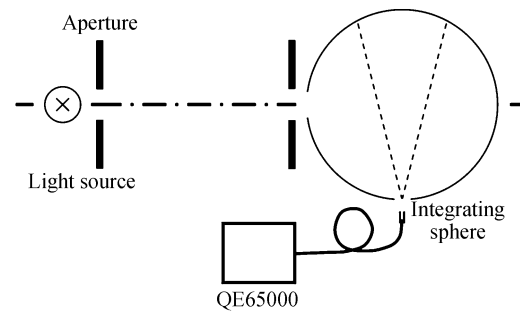


图 2 测量积分球出射光谱的实验图  
Fig. 2 Schematic diagram of measurement of output spectrum of integrating spheres

图 1 既是用漫反射板标定光谱仪的实验布置示意图, 也是测量光源光谱分布的实验示意图. 前者使用的光源为光谱辐射标准灯, 后者则使用 A 光源或氙灯. 采用垂直/45° (或 0/45) 的标准照明与测量条件, 光纤有效视场在漫反射板上的投影面积不超过漫反射板总面积的 1/3. 漫反射板使用 PTFE 标准白板, 其光谱反射比  $\rho(\lambda)$  已知, 见图 3. 图 3 中还对比画出了实验室另一块  $\text{BaSO}_4$  标准白板的光谱反射比, 从图中可以看出, 两种材料的光谱反射比均存在非中性, 特点是光谱反射比在可见、近红外波段整体随波长增加而缓慢增大; 但  $\text{BaSO}_4$  材料的光谱反射比在短波蓝光部分下跌较大, 且在近红外 940 nm 之后又略有下降, 其非中性要大于 PTFE 材料.

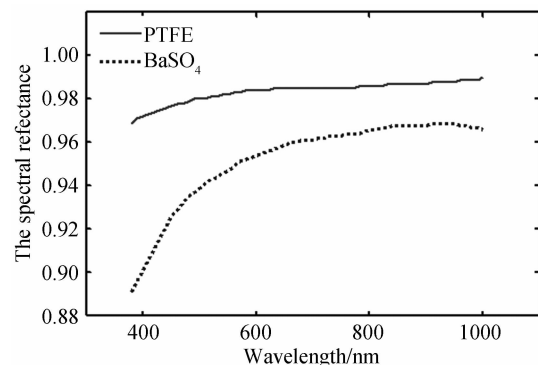


图 3 PTFE 和  $\text{BaSO}_4$  漫反射板的光谱反射比  
Fig. 3 Spectral reflectance of PTFE/ $\text{BaSO}_4$  diffuser

考虑到 PTFE 漫反射板在单次反射中其光谱反射比的非中性可以忽略,因此光谱辐亮度标定计算公式为<sup>[12]</sup>

$$L(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)E(\lambda)}{\pi} \approx \frac{\bar{\rho}}{\pi}E(\lambda) \quad (5)$$

式中 $\bar{\rho}$ 是漫反射板的平均反射比, $E(\lambda)$ 是由光谱辐射标准灯提供的标准光谱辐照度, $L(\lambda)$ 是漫反射板在受到辐照度 $E(\lambda)$ 照射时的表面光谱辐亮度.由于标定和测量时使用同一块 PTFE 漫反射板,根据图 1 测量光源光谱分布时,使用标定好的光谱仪测量得到的光谱辐亮度分布也将直接反应光源的光谱分布.因此,利用图 1 测量得到的光源光谱分布也就是图 2 中积分球的入射光谱分布.

图 2 是测量积分球出射光谱的实验示意图.光源为 A 光源或氙灯,积分球将先后使用硫酸钡涂层和聚四氟乙烯涂层的两种积分球.光纤置于积分球开口处,石英光纤的数值孔径较小(约为 0.22),即光纤的有效视场角约为  $25^\circ$ ,因而可以起到挡板的作用,阻止入射窗和出射窗之间、第一入射点和出射窗之间光束的直接传递.

另外,在仪器标定和实验测量过程中,光谱仪均采用同一积分时间进行测量,以排除光谱仪积分时间非线性的影响.

## 2.2 测量结果

图 4 和图 5 分别是在 A 光源和氙灯下测量两种积分球入射光与出射光的光谱分布结果.从图中可以看出,由于积分球内壁涂层光谱反射比非中性的存在,光(辐射)通过积分球时受到比内壁涂层大得多的非中性影响,使得积分球出射光谱与入射光谱并非完全一致:表现为出射光谱较入射光谱而言,

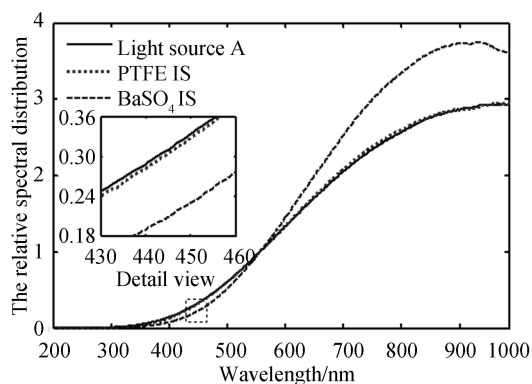


图 4 A 光源作为入射光源时 PTFE 和 BaSO<sub>4</sub> 积分球出射光的光谱分布(归一化波长:555 nm)

Fig. 4 Output spectra of PTFE/BaSO<sub>4</sub> integrating spheres under light source A (normalized wavelength:555 nm)

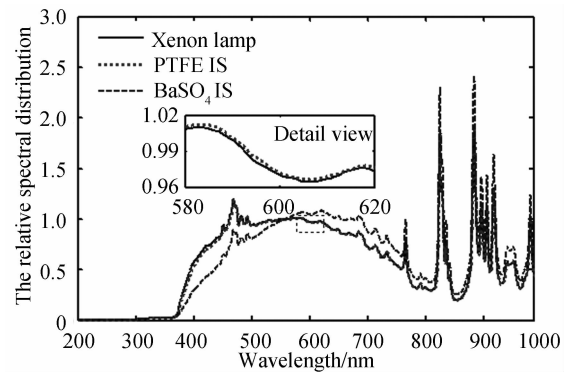


图 5 氙灯作为入射光源时 PTFE 和 BaSO<sub>4</sub> 积分球出射光的光谱分布(归一化波长:555 nm)

Fig. 5 Output spectra of PTFE/BaSO<sub>4</sub> integrating spheres under a Xenon lamp (normalized wavelength:555 nm)

波长越短,受到压制越大,从而使得长波段变得相对丰富.即在归一化波长 555 nm 之前,两种积分球的出射光谱相对入射光谱均降低,而在 555 nm 之后,两种积分球的出射光谱相对入射光谱均升高.两种涂层的积分球非中性对出射光谱的影响特征相同,这是由 BaSO<sub>4</sub> 涂层和 PTFE 涂层光谱反射比随波长增加均缓慢增大的趋势决定的.

但由于 BaSO<sub>4</sub> 涂层光谱反射比的非中性较 PTFE 涂层更大,故同样的入射光,经过 BaSO<sub>4</sub> 积分球后,出射光谱成分变化更大.并且,在图 4 中可以发现 BaSO<sub>4</sub> 积分球的出射光谱在 940 nm 附近出现明显的峰,与 A 光源光谱差别明显,这与 BaSO<sub>4</sub> 材料的光谱反射比在 940 nm 之后略有下降的趋势有关.按照式(1)进行数值模拟发现,如果将 BaSO<sub>4</sub> 材料的光谱反射比在 940 nm 之后改成恒定或上升,BaSO<sub>4</sub> 积分球出射光谱在 940 nm 之后也将相应变为恒定或上升,其原因在于:A 光源光谱在 940~1 000 nm 之间几乎不变,而此波段内 BaSO<sub>4</sub> 材料的光谱反射比略有下降,使得出射光谱分布接近于  $\rho(\lambda)/(1-\rho(\lambda))$  分布.

另外,根据测得的入射光与出射光的光谱分布,可计算出相应的色坐标和色温,结果如表 1.从表中可以看出,两种涂层的积分球非中性对出射光谱的影响表现在色度上均是出射光的色坐标( $x, y$ )增大,色温降低.其中,在以 A 光源和氙灯分别作为积分球入射光源时,PTFE 积分球的出射光色温分别降低约 20 K 和 70 K;而 BaSO<sub>4</sub> 积分球的出射光色温则分别降低约 300 K 和 1 000 K,由积分球非中性造成的出射光谱变化非常明显,对一些光(辐射)度测量的结果可能会产生不可忽视的影响.

表 1 PTFE 和 BaSO<sub>4</sub> 积分球出射光的色坐标和色温Table 1 Chromaticity coordinates and color temperature of output light of PTFE/BaSO<sub>4</sub> integrating spheres

	Light source A			Xenon lamp		
	Output light			Output light		
	Incident light	PTFE integrating sphere	BaSO <sub>4</sub> integrating sphere	Incident light	PTFE integrating sphere	BaSO <sub>4</sub> integrating sphere
Chromaticity $x$	0.449 5	0.451 1	0.478 9	0.336 7	0.338 6	0.373 6
Coordinates $y$	0.408 3	0.409 0	0.417 6	0.345 7	0.348 2	0.378 7
Color temperature/K	2 833	2 814	2 505	5 323	5 248	4 204

### 3 结论

积分球非中性是积分球应用中包括放置样品处的球壁厚度、内壁均匀性、挡屏的使用和积分球开孔大小等在内的主要误差影响因素之一<sup>[13]</sup>。由于内壁涂层光谱反射比或多或少地随波长变化,因而光(辐射)通过积分球时将受到积分球非中性的影响。分析表明,积分球光谱透过率的非中性与内壁涂层光谱反射比的非中性正相关,且积分球多次漫反射的累积作用会放大内壁涂层光谱反射比的非中性,并对高反射比的量值变化敏感。

为了研究积分球中非中性对出射光谱成分的影响,分别以 A 光源和氙灯作为入射光源,测量了 BaSO<sub>4</sub> 涂层和 PTFE 涂层积分球出射光的光谱分布、色坐标和色温。测量结果表明,出射光谱较入射光谱而言,波长越短,受到压制越大,从而使得长波段变得相对丰富;体现在色度上则是出射光的色坐标( $x, y$ )增大,色温降低。两种积分球的非中性对出射光谱的影响特征相同,这是由 BaSO<sub>4</sub> 涂层和 PTFE 涂层光谱反射比随波长增加均缓慢增大的趋势决定的。其中,PTFE 涂层积分球的非中性较小,在 A 光源、氙灯分别作为入射光源时,其出射光色温分别降低约 20 K 和 70 K,出射光谱与入射光谱较好地保持了一致。而 BaSO<sub>4</sub> 涂层积分球的非中性更大,出射光谱与入射光谱差别明显,相同测量条件下,其出射光色温分别降低了约 300 K 和 1 000 K,非中性对一些光(辐射)度测量的结果会产生不可忽视的影响。

实际应用中,要减小积分球非中性的影响,应该选择中性良好、反射比量值适当的涂料。也可以根据非中性对出射光谱的影响特征采取一些补偿措施,如外部导入光源可在积分球入射口前放置合适的升色温玻璃;对于积分球内置光源,如卤钨灯,可适当增大灯的工作电流以提高色温,补偿非中性的影响。

### 参考文献

- [1] CIE 84-1989. The measurement of luminous flux [S]. Vienna: CIE Publication, 1989.
- [2] CIE 127-2007. Measurement of LEDs [S]. Vienna: CIE Publication, 2007.
- [3] JERNSEHØJ K D, HASSING S. Analysis of reflectance and transmittance measurements on absorbing and scattering small samples using a modified integrating sphere setup [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 879-888.
- [4] WANG Gao-ming, GUO Cheng, ZHANG Liang-liang, et al. Simulation of the light energy uniformity of integrating sphere based on Monte Carlo method [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(1): 67-69.  
王高明, 郭城, 张亮亮, 等. 积分球光能均匀性的 Monte Carlo 模拟[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(1): 67-69.
- [5] WANG Jin-jiang, YANG Zhi-wen. The application of random variable in the designing of integrating sphere [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1406-1408.  
王晋疆, 杨志文. 随机变量在积分球设计中的应用[J]. *光子学报*, 2001, **30**(11): 1406-1408.
- [6] ZHANG Bao-zhou, XIE Yin-zhong. Research of integrating sphere for cosine response of radiometer [J]. *Acta Metrology Sinica*, 2009, **30**(3): 209-211.  
张保洲, 谢印忠. 积分球余弦校正器误差的研究[J]. *计量学报*, 2009, **30**(3): 209-211.
- [7] PAN Jian-gen. Why inner coating of integrating spheres is not the whiter the better? [J]. *Lamp & Lighting*, 2002, (4): 7.  
潘建根. 为什么积分球内涂层不是越白越好? [J]. *光源与照明*, 2002, (4): 7.
- [8] SHITOMI H, MISHIMA Y, SAITO I. Development of a new integrating sphere with uniform reflectance for absolute diffuse reflectance measurements [J]. *Metrologia*, 2003, **40**(1): S185-S188.
- [9] JACQUEZ J A, KUPPENHEIM H F. Theory of the integrating sphere [J]. *JOSA*, 1955, **45**(6): 460-470.
- [10] GOEBEL D G. Generalized integrating sphere theory [J]. *Appl Opt*, 1967, **6**(1): 125-128.
- [11] OHKUBO K. Integrating sphere theory for measuring optical radiation [J]. *J Light Vis Environ*, 2010, **34**(2): 111-122.
- [12] 郝允祥, 陈遐举, 张保洲. 光度学[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010: 48-51.
- [13] TANG Shun-qing, ZHU Zheng-fang. Systematic error analysis of integrating sphere [J]. *Measurement Technique*, 2005, (12): 30-32.  
汤顺青, 朱正芳. 积分球的系统误差分析[J]. *计量技术*, 2005, (12): 30-32.

## Effects of Integrating Sphere Non-neutrality on Output Spectrum

LU Li-gen<sup>a</sup>, ZHANG Bao-zhou<sup>a,b</sup>, ZHANG Jun-yuan<sup>a</sup>

(*a. Department of Astronomy; b. Beijing Key Laboratory of Applied Optics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstract:** Changes in spectral properties of output light are analyzed from the angle of integrating sphere non-neutrality. Based on integrating-sphere theory, the relationship between non-neutrality of integrating-sphere spectral transmittance and that of spectral reflectance of inner coating is derived. It shows that non-neutrality of integrating spheres is usually greater than that of inner coatings, and integrating sphere non-neutrality increases with the rise of coating reflectance when coating non-neutrality remains unchanged. Then spectral distribution, chromaticity coordinates and color temperature of output light are measured under illumination of light source A and a Xenon lamp respectively. The measurement results indicate that effects of non-neutrality of barium sulfate and polytetrafluoroethylene integrating spheres on output spectrum are both the increase of chromaticity coordinates and decrease of color temperature. For the polytetrafluoroethylene integrating sphere, color temperature of output spectrum is reduced for about 20 K and 70 K respectively when incident light source is light source A and a Xenon lamp. While for the barium sulfate integrating sphere, color temperature is reduced for about 300 K and 1 000 K respectively, which implies more remarkable influence on output spectrum.

**Key words:** Integrating sphere; Non-neutrality; Spectral distribution; Chromaticity coordinates; Color temperature