

文章编号 1004-924X(2010)07-1498-06

# 标准漫反射板绝对反射比因子测量装置

盛建军<sup>1</sup>, 张黎明<sup>2</sup>

(1. 合肥学院 数学与物理系, 安徽 合肥 230022; 2 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**分析和研究了测量绝对反射比因子的原理,设计、制作了一套可以测量光源入射照度和反射辐亮度的比辐射计和一套45°/0°漫反射板绝对反射比因子测量装置。首先,使用比辐射计测量光源的入射照度和反射辐亮度,给出漫反射板绝对反射比因子的计算公式;然后,根据推导公式中辐射亮度由测量比辐射计的光阑面积决定,提出一种新的光学方法来精确测量光阑面积,从而提高测量精度。最后,介绍了测量装置的设计和其它部件的制作过程。采用该装置实验测量了安徽光学精密机械研究所研制的标准漫反射板在633~960 nm的绝对反射比因子,得到的装置的测量不确定度为0.19%。实验结果表明,该测量装置测量方法简单、精度高,可以满足反射比因子的测量要求。

**关键词:**辐射定标;辐射亮度;辐射照度;绝对反射比因子;漫反射参考板

**中图分类号:** O432 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1498

## Reflectometer for absolute reflectance factor of standard diffuse panel

SHENG Jian-jun<sup>1</sup>, ZHANG Li-ming<sup>2</sup>

(1. *Mathematics and Physics Department, Hefei University, Hefei 230022, China;*

2. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

**Abstract:** The measuring principle of absolute reflectance factors was discussed, and a specific radiometer to measure both the incident irradiance and reflected radiance and a reflectometer to measure the absolute reflectance factor were designed. On the basis of the measurements of the incident irradiance and the reflected radiance, the formula for calculating the absolute reflectance of a diffuse panel was deduced, then in consideration of the measuring accuracy depended on the aperture area, a new method was proposed to measure the aperture area to achieve an exact solid angle. Finally, the design of reflectometer and the fabrication of related devices were introduced. The reflectometer was used to measure the absolute reflectance factors of a standard diffuse panel at visible and near-infrared wavelengths(633-960 nm) and results show that the uncertainty obtained by this system is 0.19%. These results demonstrate that the measuring method is simple, and can satisfy the requirements of reflecting factor measurement for the accuracy.

**Key words:** radiometric calibration; radiance; irradiance; absolute reflectance factor; diffuse panel

收稿日期:2009-06-22;修订日期:2009-09-30.

基金项目:合肥学院2009年度自然科学研究发展基金资助项目(No. 09KY08ZR)

## 1 引言

物质或材料的漫反射特性对辐射度学、光度学以及色度计量等其它研究领域具有重要意义,随着遥感、辐射定标技术<sup>[1-2]</sup>在众多领域的广泛应用,代表其应用水平高低的漫反射特性的测量精度极受关注。

国际照明委员会(CIE)于1969年推荐的测量条件指出,不透明材料进行色度计量<sup>[3]</sup>时可采用理想漫射体作为主要的参考标准。但实际上没有任何材料的漫反射特性与理想漫射材料的漫射特性完全一致,绝大多数材料的反射特性是用待测样品与已知反射比特性的标准样品对比测量得到的,测得的是待测样品的反射比因子<sup>[4]</sup>。如 $0^\circ/45^\circ$ 地物、水体等漫反射目标的方向反射特性在定量化遥感研究与应用中一般以漫反射参照板为参照标准。

近年来,标准参照在材料与测量方面均取得了大的进展。在材料方面,从氧化镁发展至目前的硫酸钡和PTFE材料,其反射率、光谱平坦性、光谱范围、朗伯性得到改进,稳定性得到提高。漫反射参照板<sup>[5]</sup> $0^\circ/45^\circ$ 绝对反射比因子测量方法<sup>[6-8]</sup>的研究对提高定量化测量材料特性的水平有重要意义。

本文在以低温绝对辐射计为基准建立光功率探测器传递标准的基础上,对绝对反射比因子的测量原理进行了分析和研究,通过对立体角、面积、距离等几何因子参数的精确测量,设计了一整套实验室测量漫射体绝对反射比因子的装置,介绍了该装置的工作原理和制作过程,利用该装置实验测量了一标准漫射板在633~960 nm的绝对反射比因子。实验表明,这套装置具有使用简便、精度高、可靠性好的特点。

## 2 测量装置原理

绝对反射比因子是指以待测物体表面一点为顶点的给定方向立体角范围内的反射辐射通量与相同入射条件下理想漫反射体反射辐射通量的比值<sup>[9]</sup>。

$$R(\theta, \varphi; \theta', \varphi') = \frac{d\Phi}{d\Phi_{\text{Lambert}}} = \frac{L'(\theta', \varphi') \cos \theta' d\Omega' ds}{\left(\frac{E(\theta, \varphi)}{\pi}\right) \cos \theta' d\Omega' ds} = \pi \frac{L'(\theta', \varphi')}{E(\theta, \varphi)}, \quad (1)$$

其中 $\theta', \varphi'$ 分别为反射天顶角和方位角, $\theta, \varphi$ 分别为入射天顶角和方位角, $L'(\theta', \varphi')$ 为反射辐亮度, $E(\theta, \varphi)$ 为入射辐照度。

漫反射参照板的反射比因子是将待测漫反射板和理想朗伯表面在相同的入射和观测条件下测得的读数之比。所谓理想朗伯表面就是指入射辐射完全反射即反射比为1,各方向反射辐亮度相等,具有朗伯漫射特性的表面,通常以它作为各种表面反射性质的比较基准。

用反射辐射量度和入射辐照度的比值来描述材料表面的反射特性时,这种描述具有唯一性,反射比因子和观测立体角的大小无关,而仅仅取决于材料表面的反射特性。

CIE推荐了4种测量反射比因子的几何条件: $45^\circ/\text{nomal}$ ,  $\text{nomal}/45^\circ$ ,  $\text{diffuse}/\text{nomal}$ ,  $\text{mormal}/\text{diffuse}$ 。

本文设计、制作、建立了一整套可以测量入射辐照度和反射辐亮度的比辐射计和一套 $45^\circ/0^\circ$ 漫反射板绝对反射比因子测量装置,通过比辐射计对光源辐照度、反射辐亮度的测量计算,给出漫射板绝对反射比因子。分别测量入射辐照度和反射辐亮度后,根据式(1)计算得到绝对反射比因子,方案如图1、2所示。

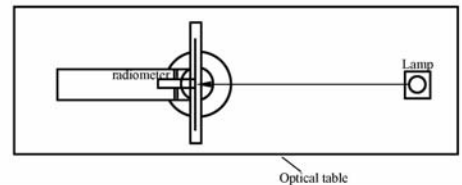


图1 入射辐照度测量原理

Fig. 1 Incident irradiance measurement

根据式(1)有:

$$R(45^\circ/0^\circ) = \pi L(45^\circ/0^\circ)/E(45^\circ), \quad (2)$$

而反射测量时的照度为:

$$E(45^\circ) = E_{\perp} \cos 45^\circ, \quad (3)$$

式中 $E_{\perp}$ 为入射辐照度,反射辐亮度测量如图3所示。

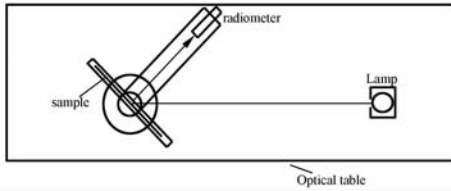


图 2 反射辐亮度测量原理

Fig. 2 Reflected radiance measurement

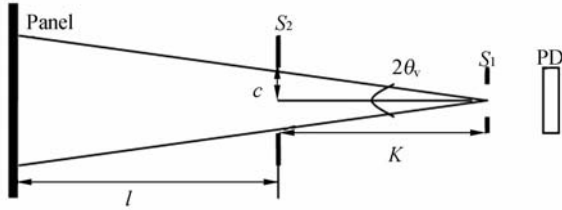


图 3 反射辐亮度测量原理

Fig. 3 Schematic diagram of reflected radiance measurement

根据上图可得反射辐亮度为：

$$L(45^\circ/0^\circ) = \frac{\Phi}{\Omega A \cos \theta} = \frac{\Phi_r(45^\circ/0^\circ)}{\int_{S_1} \frac{ds}{(l+k)^2} d\sigma \pi [(l+k) \tan \theta_v]^2 \cos 0^\circ} = \frac{V_r(45^\circ/0^\circ)}{\pi S_1 \tan^2 \theta_v R_\Phi}, \quad (4)$$

其中  $l$  为物面距视场光阑距离,  $k$  为孔径光阑距视场光阑距离,  $\theta_v$  为视场角,  $R_\Phi$  为探测器的功率响应度,  $V_r(45^\circ/0^\circ)$  为探测器反射光强的输出电压,  $\tan \theta_v = c/k$ 。

入射照度测量如图 4 所示

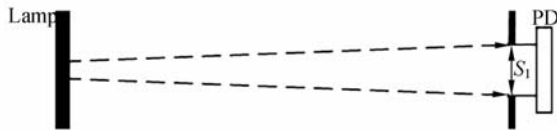


图 4 入射辐照度测量原理

Fig. 4 Schematic diagram of incident irradiance measurement

在实际测量中灯光虽然只是近似平行光,但是可以认为:

$$E_\perp = \frac{\Phi_i}{S_1} = \frac{V_i}{S_1 R_\Phi}, \quad (5)$$

其中  $V_i$  为探测器入射光强的输出电压。

因为测量时使用同样的探测器,所以在运算时可以将式(4)中的功率响应度消去,因而综合式

(2)~(5)有:

$$R(45^\circ/0^\circ) = \frac{\pi L(45^\circ/0^\circ)}{E_\perp \cos 45^\circ} = \frac{\pi V_r(45^\circ/0^\circ)}{\pi S_1 \tan^2 \theta_v} \frac{S_1}{V_i \cos 45^\circ} = \frac{\pi k^2}{S_2 \cos 45^\circ} \frac{V_r(45^\circ/0^\circ)}{V_i}, \quad (6)$$

其中  $S_1$  为比辐射计小孔光阑的面积,  $S_2$  为比辐射计视场光阑的面积,  $l$  为比辐射计小孔光阑距面板距离。

### 3 总体设计

光学系统的构思与设计的好坏直接影响测量精度,为了满足多波段反射比因子测量要求,将比辐射计的光学部分固定在旋转臂上,为了方便探测器与光学部分的组合和探测器的拆卸在光学部分与探测器之间制作了接口。

比辐射计在测量辐亮度时需要精确地测量入射立体角和所观测面积。入射立体角由孔径光阑确定,所观测面积是由孔径光阑和视场光阑共同确定的,所以光学设计的关键就是要确定合适的孔径光阑和视场光阑的尺寸。

辐亮度定义为光源在垂直其辐射传输方向上每单位光源表面积在单位立体角内发出的辐射通量。根据这一定义测量辐亮度时,必须先要得到可测量的辐射通量、发光面元的面积和立体角 3 个参量。这里测量的辐亮度是传输到孔径光阑处的辐亮度,也就是说,将孔径光阑看作发光面元,同样,将探测器本身所设计的最大允许孔径角看作接收立体角,这样在用探测器确定入射光辐亮度时必须满足以下条件:

(1) 入射光束必须充满孔径光阑。孔径光阑的大小是辐亮度定义中的一部分,是必须精确测量的。如果入射光束不能充满孔径光阑,则辐亮度定义中的  $dA$  将失去意义,无法精确测量入射光束的实际直径。

(2) 入射光束的发散角必须大于探测器的最大接收角,只有这样探测器才可以从光束中提取立体角确定的一部分进行测量。如果入射光束的发散角很小,例如发散角很小的准平行光,就很难从角度上得到,也就无法测量。

在没有任何其它光阑的情形下,以探测器直接观测目标时,光电二极管的光敏面就起到了孔

径光阑的作用,可以认为是孔径光阑。但在实际应用中,不应以光敏面作为孔径光阑,因为 S1337 光电二极管光敏面的大小很难准确测量。而且,本测试装置没有利用完整的矩形光敏面,而只是采用它的中心处  $\Phi 10$  mm 的部分光敏面,所以,在单片探测器之前另外安装了直径可以精确测量的孔径光阑来限定入射孔径角,孔径光阑直径的选择应使入射光束投射在光敏面上的光斑直径  $< 10$  mm。

实际设计中,考虑入射立体角是由孔径光阑确定的,所以对孔径光阑的大小进行了精密加工和精密测量。为了便于机械加工和精密测量,孔径光阑的半径不应该太小。孔径光阑尺寸测量对于辐亮度的计算很关键,如果要求其面积的不确定度为 0.3%,则直径的测量不确定度必须小于 0.15%,如果面积为 1 mm,绝对不确定度是  $3 \mu\text{m}$ ,这已经接近于通用机械尺寸测量装置(如工具显微镜)的精度极限。如果缩小孔径光阑的尺寸,保证其测量不确定度将更为困难。当然,孔径光阑的半径也不能过大,合适的孔径光阑应该既便于加工和测量,又能使有效视场有一定的大小。反射比因子的最终公式中含有几何因子,视场角  $\theta$  是由视场光阑半径和视场光阑与孔径光阑之间的距离共同决定的,因此视场光阑与孔径光阑之间的间距测量精度会直接影响到最终反射比因子计算精度。

根据上述原理和构想,设计的比辐射计的参数如表 1。

表 1 比辐射计主要参数

Tab. 1 Parameters of radiometer

测量参数	数值
最小观测距离	0.2 m
孔径光阑直径	4 mm
最大入射孔径全角	$4.3^\circ$
视场光阑直径	6 mm
视场全角	$6.8^\circ$

实际应用中,还可以在视场光阑和孔径光阑之间设置消杂光光阑。

制作光阑时,应选择线膨胀系数小的材料,考虑现有的机械加工条件和工艺,本文采用碳素钢制作光阑,光阑表面做发黑处理,并且精测加工的

光阑面积。

测量光阑面积采用了一种新的测量孔径面积的数学方法<sup>[9-10]</sup>,该方法采用了一个二维叠加的等间距激光束形成了空间均匀照度分布,激光光束的重叠是通过在与光强稳定的激光束垂直的平面内移动小孔来实现的,测量激光光束的辐射通量即可得出其形成的照度。孔径面积最终可以由计算通过小孔的辐射通量的总和与已知照度的比值得到,该方法<sup>[11]</sup>对光阑面积测量的不确定度达到  $10^{-4}$  量级。

比辐射计中滤波片选取美国 Andover 公司生产的波长为 633,676,830,900,966 nm 的 5 种窄带干涉滤光片。

装置中使用了安徽光机所遥感研究室研制的采用 Hamamatsu S1337 光电二极管制作的探测器。

## 4 实验结果

以安徽光学精密机械研究所遥感研究室研制的漫反射参考板作为样品,实验中对  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  规格的漫反射板的反射比因子进行了测量。该漫射板为聚四氟乙烯(PTFE)材料,具有良好的朗伯漫射特性,反射比接近于 1,在可见至近红外谱段光谱反射比比较平坦,是一种理想的漫反射材料。光源采用卤钨灯,额定功率为 1 000 W,工作电流为 7 A。

将获得的数据带入式(5),得到的漫反射板在各光谱波段的  $45^\circ/0^\circ$  绝对反射比因子如图 5:

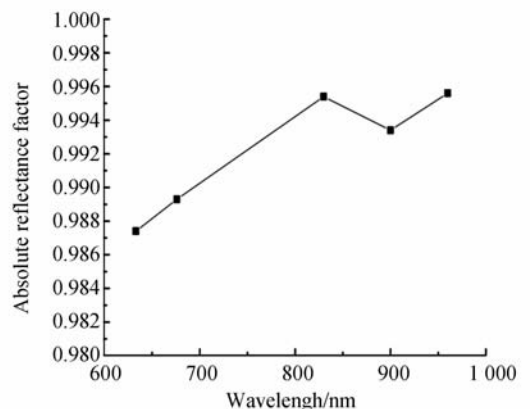


图 5 各光谱波段的绝对反射比因子

Fig. 5 Absolute reflectance factor of different wavelengths

## 5 不确定度分析

在进行绝对反射比因子测量的过程中,影响精度的因素如下:

- (1) 探测器入射辐射通量测量不确定度
- (2) 探测器反射辐射通量测量不确定度
- (3) 长度误差
- (4) 光阑面积测量不确定度

其原因综合分析如下:

(1) 探测器反射辐射通量测量不确定度主要是由于光源的不稳定,探测器前置放大器漂移和噪声以及电压测量的噪声等原因造成的(参见图 6)。对反射辐射通量测量 3 h 的不确定度为 0.1%。

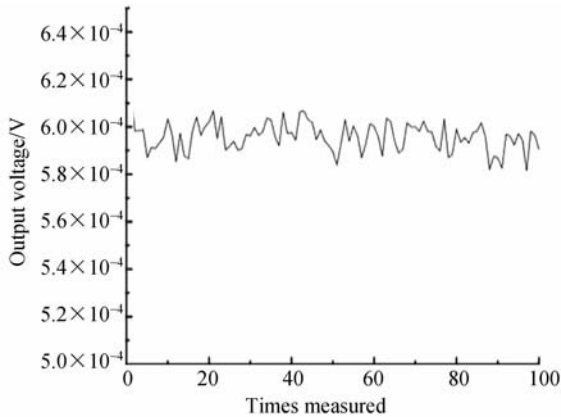


图 6 反射辐射通量测量数据曲线

Fig. 6 Results of reflected flux measurement

(2) 探测器入射辐射通量测量不确定度的原因同上(参见图 7)。对入射辐射通量测量 3 h 的

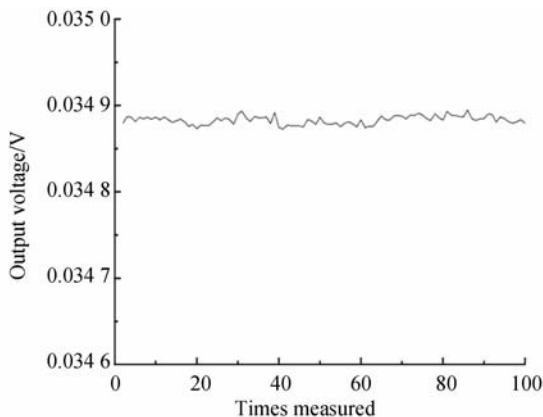


图 7 入射辐射通量测量数据曲线

Fig. 7 Results of incident flux measurement

不确定度为 0.1%。

(3) 比辐射计设计中长度的误差。比辐射计的视场光阑与孔径光阑之间设计的距离  $k = 50$  mm,由机械加工造成的不确定度为 0.06%。

(4) 光阑面积测量精度。根据前面对 6 mm 光阑面积测量不确定度的分析,光阑面积测量不确定度为 0.036%。

装置总的不确定度见表 2:

表 2 测量装置的不确定度评估

Tab. 2 Uncertainty budget for reflectometer

	标准相对不确定度( $k=1$ )
入射辐射通量	0.1%
反射辐射通量	0.1%
长度误差	0.06%
光阑面积	0.036%
合成标准不确定度	0.19%

## 6 结 论

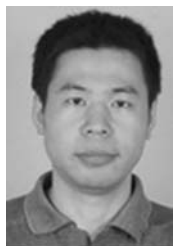
本文简要介绍了材料漫射特性测量的基本方法,系统地讨论了漫反射参照板  $0^\circ/45^\circ$  绝对反射比因子测量的原理。

根据绝对反射比因子计算原理,推导出反射比因子测量公式,在此基础上设计制作了一套绝对反射比因子测量装置,并对设计方案的可行性进行了理论分析和实验验证。采用该装置实验测量了安徽光学精密机械研究所生产的标准漫射板在 633~960 nm 间 5 个波段的绝对反射比因子,最后分析了系统的误差及产生的原因。实验结果表明,该系统具有较高的定标精度、可靠性和可重复性,其综合不确定度为 0.19%,满足作为高精度辐射定标和标准传递和工程应用定标的技术要求。作者对进一步提高测量系统的性能提出了建议。

## 参考文献:

- [1] 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.  
WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 185-190. (in Chinese)
- [2] 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.  
WANG R, SONG K F. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):469-474. (in Chinese)
- [3] 冯志庆,王淑荣,王晓君,等. PDP荧光粉的相对亮度与VUV激发光谱的测量[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1):59-63.  
FENG Z Q, WANG SH R, WANG X J, *et al.*. Measurements of relative luminance and VUV excitation spectra for PDP phosphors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):59-63. (in Chinese)
- [4] NICODEMUS F E, RICHMOND J C, HSIA J J, *et al.*. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance[R]. NIST Monograph 1977:160.
- [5] 杨本永,张黎明,沈政国,等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1851-1858.  
YANG B Y, ZHANG L M, SHEN ZH G, *et al.*. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1851-1858 (in Chinese)
- [6] HSIA J J, WEIDNER V R. NBS 45° normal reflectometer for absolute reflectance factors[J]. *Metro.*, 1981, 17:97-102.
- [7] MARIA E, YVONNE B P. Near infrared 45°/0° reflectance factor of pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) powder[J]. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1999, 104:185-188.
- [8] YVONNE B P, HSIA J J. 45°/0° Reflectance Factors of Pressed Polytetrafluoroethylene (PTFE) powder[C]. NIST Technical Note, 1995, 1413-1417.
- [9] Commission International de l'éclairage. *International Lighting Vocabulary* [M]. CIE Publ., 1987.
- [10] JOEL B F. High accuracy measurement of aperture area relative to a standard known aperture [J]. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1995, 100(3):277-283.
- [11] 盛建军,张黎明,郑小兵,等. 精确测量孔径光阑面积的光学方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 534-537.  
SHENG J J, ZHANG L M, ZHENG X B, *et al.*. Optical method for accurate measurement on the area of aperture diaphragm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 534-537. (in Chinese)

## 作者简介:



盛建军 (1976—),男,山东宁阳人,讲师,2006年于中科院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事光信息科学方面的研究。E-mail: sjj2000@126.com



张黎明 (1954—),男,安徽合肥人,研究员,1990年于中国科技大学获得博士学位,主要从事光辐射定标等方面的研究。E-mail: lmzhang@hfcas.ac.cn