

紫外波段大口径积分球辐射源研制

李佳伟^{1,2*}, 陈洪耀^{1**}, 张黎明¹, 王戟翔¹¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 为了满足航天载荷对大口径、高亮度紫外积分球辐射源的定标需求,采用全新工艺研制了内径为 2200 mm、出光口径为 800 mm 且采用全压制聚四氟乙烯(PTFE)涂层的大型积分球辐射源,聚四氟乙烯涂层厚度为 25 mm。积分球内置 10 kW 卤钨灯光源并外置两台带有电动光阑的总功率为 14 kW 的氙灯光源,可实现 4 个量级的大动态范围调节。经测试,该积分球在 250 nm 处的辐亮度为 $0.54 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,在 279~400 nm 紫外波段处的辐亮度大于 1 个太阳常数,辐亮度定标扩展不确定度为 5.28%。对紫外积分球辐射源的各项性能进行了测试,结果表明,紫外辐射源的面非均匀性在 380 nm 处为 0.65%;在扫描夹角为 $-20^\circ \leq \theta \leq +20^\circ$ 时,水平和垂直方向上的角非均匀性优于 0.49%, $\pm 45^\circ$ 方向上的角非均匀性优于 0.69%。对光谱反射率对面均匀性及角均匀性的影响开展了研究,研究结果表明,随着光谱反射率的提高,面非均匀性下降 0.17 个百分点,角非均匀性下降 0.15 个百分点。对辐射源稳定性、荧光效应及系统热平衡展开了测试研究,所研制的紫外积分球辐射源具有紫外波段(250~400 nm)亮度高、口径大、均匀性好及可靠性高等特点,是理想的大面积郎伯面源,可满足紫外波段航天载荷辐射定标需求。

关键词 测量; 紫外积分球; 压制涂层; 高亮度; 大口径; 辐射定标

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2012005

Development of Large Aperture Integrating Sphere Radiation Source in Ultraviolet Band

Li Jiawei^{1,2*}, Chen Hongyao^{1**}, Zhang Liming¹, Wang Jixiang¹¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract In order to meet the radiometric calibration requirements of space payloads for large aperture and high radiance ultraviolet (UV) integrating spheres, a large integrating sphere radiation source with an inner diameter of 2200 mm, an exit aperture diameter of 800 mm and a fully pressed PTFE coating is developed by a new technology. The thickness of the PTFE coating is 25 mm. The integrating sphere has a 10 kW halogen lamp light source and two external 14 kW xenon lamp light sources with an electric aperture, which can achieve a 4 orders of magnitude of large dynamic range adjustment. The radiance of the integrating sphere at 250 nm is $0.54 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ and in the 279–400 nm ultraviolet band, the radiance is greater than one solar constant. The expanded uncertainty of radiance calibration is 5.28%. The performance of the UV integrating sphere is also tested, and the results show that the non-uniformity of the ultraviolet radiation source is 0.65% at 380 nm. The angular non-uniformity is better than 0.7% in the horizontal and vertical directions, and 1.05% in the $\pm 45^\circ$ directions when $-20^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$. The influences of spectral reflectance on the surface uniformity and angular uniformity are studied. The results show that with the increase of spectral reflectance, the surface non-uniformity decreases by 0.17 percentage points and the angular non-uniformity decreases by 0.15 percentage points. In addition, the stability of the radiation source, the

收稿日期: 2021-03-12; 修回日期: 2021-04-11; 录用日期: 2021-05-06

通信作者: *jiawei19@mail.ustc.edu.cn; **hychen@aiofm.ac.cn

fluorescence effect, and the thermal balance of the system are also measured. The developed UV integrating sphere radiation source has the advantages of high brightness, large aperture, good uniformity, and high reliability in the UV band (250–400 nm). It is an ideal large-area Lambert surface source and can meet the radiation calibration requirements of aerospace payloads in UV band.

Key words measurement; UV integrating sphere; pressed coating; high radiance; large aperture; radiometric calibration

OCIS codes 120.4570; 120.5630; 160.4670; 220.4610

1 引言

大气环境监测与保护是当前国家的发展战略。随着搭载大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)的高分五号卫星成功发射,我国首次实现了大气痕量气体的定量化探测。通过 EMI 获取地球大气或地表散射、反射的紫外光及可见光,利用差分吸收光谱技术反演大气中 O_3 、 NO_2 等的分布和变化,从而实现大气污染气体的监测。臭氧检测仪(OMI)、EMI 等国内外紫外遥感载荷都在向着高光谱分辨率、宽波段、大视场方向发展。美国国家航空航天局(NASA) Aura 卫星搭载的 OMI 的光谱分辨率为 0.45~1.00 nm,视场为 114° 。中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的 EMI 的光谱分辨率达到 0.3~0.5 nm,波段为 240~710 nm,视场达到 114° ,其对紫外遥感信息定量化提出了新的要求。作为紫外遥感高精度应用的前提,紫外辐射定标可以建立遥感器完整的实验室系统级响应模型,是在轨定标的基础和前提,也是实现遥感信息定量化的重要保障。因此,研制用于紫外波段遥感器实验室定标的大口径高亮度紫外辐射光源是十分必要且尤为迫切的。

在 250~350 nm 紫外波段,相较于 $BaSO_4$ 及铝涂层等,聚四氟乙烯(PTFE)涂层具有更高的反射率^[1]。目前,国内外直径在 2 m 以上的大型积分球受现有工艺的限制,均采用喷涂 $BaSO_4$ 或喷涂含聚四氟乙烯的混合涂料^[2]。这使得大型积分球在紫外波段的能量很低,均匀性差,导致待定标载荷在紫外波段无响应或信噪比弱,无法完成实验室定标。此外,在荧光效应方面,国外有研究表明,压制 PTFE 涂层荧光效应比烧结 PTFE 弱得多^[3]。国内还没有适用于航天载荷的大口径高亮度紫外辐射光源,这限制了紫外波段航天载荷的实验室定标的发展,成为制约紫外波段定量化遥感技术发展的瓶颈。

本文采用全新制造工艺,成功研制了直径为 2200 mm、出光口径为 800 mm 且采用全压制聚四氟乙烯涂层的大型积分球辐射源,光源采用总功率

为 14 kW 的外置氙灯光源,同时配备具有大动态调节范围的电动光阑,可实现 4 个量级大动态范围的辐亮度输出调节,并对高亮度紫外积分球辐射源的面均匀性、角度均匀性及荧光效应等进行了测试研究,利用灯板系统结合等色温调节法,完成了该积分球辐射源在 250~400 nm 范围内的辐亮度定标。

2 基本原理

2.1 积分球的基本原理

积分球作为辐射定标常用的辐射源,其功能就是对空间辐射通量进行积分,最终输出大面积郎伯面源。利用漫反射表面的辐射传输理论,将积分球考虑为一个理想密闭球体^[4], R 为积分球半径,球内表面有两个面元 dA_1 、 dA_2 , dA_1 的面元法线和两面元连线的夹角与 dA_2 的面元法线和两面元连线的夹角相等,则面元 dA_2 接收到来自 dA_1 面元的辐射占 dA_1 总辐射的比例为

$$dF = \frac{dA_2}{4\pi R^2} \quad (1)$$

有限面积 A_2 接收的辐射占比为

$$F = \frac{1}{4\pi R^2} \int_{A_2} dA_2 = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_S} \quad (2)$$

式中: F 为比例因数; A_S 为积分球内表面面积。

(1)式说明积分球内表面任何一个点接收的能量相同,与面元位置无关,该结论很重要。设积分球涂层反射率为 ρ ,入射辐射通量 ϕ_i (i 为积分球入光口数量)产生的积分球出射辐亮度 L 的表达式为

$$L = \frac{\phi_i \rho}{\pi A_S} \quad (3)$$

入射辐射通量 ϕ_i 经过 n 次反射后,积分球总的辐射通量为

$$\phi_i \rho (1-f) [1 + \rho(1-f) + \dots + \rho^{n-1} (1-f)^{n-1}] \quad (4)$$

式中: n 为反射次数; f 为开口比, $f = (A_i + A_e) \div A_S$,其中 A_i 为各灯座孔面积, A_e 为出光口面积。

(4)式为幂级数,且 $\rho(1-f) < 1$,级数收敛,整理后可得

$$\phi_i \sum_{m=1}^n \rho^m (1-f)^m = \frac{\phi_i \rho (1-f)}{1-\rho(1-f)} \quad (5)$$

结合(3)式,则积分球出射辐亮度 L 的表达式为

$$L = \frac{\phi_i}{\pi A_s} \cdot \frac{\rho}{1-\rho(1-f)} \quad (6)$$

为了便于研究积分球输出辐亮度与涂层反射率的关系,设开口比 $f=0$,将(6)式对反射率求偏导,得到

$$\frac{\partial L(\lambda)}{\partial \rho(\lambda)} = \frac{1}{[1-\rho(\lambda)]^2}, \quad (7)$$

式中: $L(\lambda)$ 为积分球辐亮度; $\rho(\lambda)$ 为积分球涂层反射率; λ 为波长。

由(7)式可以看出,当 $\rho(\lambda) = 0.98$ 时, $\partial L(\lambda)/\partial \rho(\lambda) = 25$,积分球输出辐亮度随涂层反射率的增加而显著增大。也就是说为了实现积分球高亮度,提高涂层反射率 ρ 是十分有效的。在紫外波段,聚四氟乙烯被认为是反射率较高的理想涂层。

此外,由积分球出射辐亮度 L 的表达式(6)式可知,当反射率 ρ 一定时,随着开口比 f 的减小,辐亮度增大。所以尽量减小开口比、减小灯座孔面积也是必要的。

2.2 高亮度积分球的定标原理

积分球辐射定标的目的是量化各电流下积分球输出的绝对辐射量。通常积分球辐亮度定标的方法有两种,即基于标准光源法和基于标准探测器法。本文基于标准光源法,对所研制的紫外积分球进行辐射定标,构建灯板系统,通过比对标准灯,将辐射标准传递给积分球。标准灯采用中国计量科学研究院(NIM)的光谱辐照度标准灯 F1017。使用的漫反射板中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的,可提供方向半球反射比测量值。积分球辐亮度计算公式为

$$L_{\text{sphere}}(\lambda) = \frac{D_{\text{sphere}}(\lambda)}{D_{\text{STD}}(\lambda)} \cdot \rho_b(\lambda) \cdot E_0(\lambda) / \pi, \quad (8)$$

式中: $L_{\text{sphere}}(\lambda)$ 为积分球辐亮度; $D_{\text{sphere}}(\lambda)$ 为积分球测量值; $D_{\text{STD}}(\lambda)$ 为标准光源测量值; $\rho_b(\lambda)$ 为漫射板半球反射比; $E_0(\lambda)$ 为标准灯照度。

相比积分球,灯板系统在紫外波段的辐亮度低得多。以 350 nm 波段为例,测试数据显示,积分球的辐亮度是灯板系统的 25 倍以上。这会影响到定标精度,为了获得足够的响应,达到良好的信噪比,在用高光谱辐射计测试灯板系统时,其积分时间设置在一定范围内。然而,在利用高光谱辐射计测量高

亮度积分球时,积分时间则需要远低于灯板系统的积分时间,这样可以避免辐射计饱和。为了解决上述高亮度积分球定标问题,本文采用等色温调节法^[5]。我们同时控制两个外置氙灯光源的耐高温电动光阑,将进入到积分球内部的光通量进行衰减处理,并观测海洋光谱仪在 250 nm 处的测量值,直至该测量值接近测量灯板系统时的测量值,采集数据并按照(8)式进行处理,得到积分球辐亮度 $L_{\text{sphere},1}(\lambda)$ 。与此同时,采用 ASD 高光谱辐射计作为监视器,对积分球亮度进行监测,得到 350 nm 处的响应值 D_{ASD1} 。在海洋光谱仪测量完成后,将两侧外置氙灯的电动光阑完全打开,氙灯能量全部进入到积分球内部,此时 ASD 再次采集紫外波段 350 nm 处的测量值 D_{ASD2} 。根据等色温调节原理,最终紫外积分球的辐亮度为

$$L_{\text{sphere},k}(\lambda) = k \cdot L_{\text{sphere},1}(\lambda), \quad (9)$$

$$k = \frac{D_{\text{ASD2}}}{D_{\text{ASD1}}}, \quad (10)$$

$$L_{\text{sphere},k}(\lambda) = L_{\text{sphere},1}(\lambda) \frac{D_{\text{ASD2}}}{D_{\text{ASD1}}}, \quad (11)$$

式中: $L_{\text{sphere},k}(\lambda)$ 为亮度等级为 k 时积分球的辐亮度。

采用电动光阑进行等色温调节,将积分球亮度调整到与灯板系统同一水平,这可以大大减小海洋光谱仪的非线性带来的影响。另一方面,在测量灯板系统时,可以优化辐射计的积分时间,使得信噪比达到最佳水平,从而提高辐射定标精度。

3 测量装置

3.1 大口径紫外积分球辐射源的研制

大口径紫外积分球辐射源主要由积分球球体、电控柜、外置光源及电动光阑组成^[6-8],如图 1 所示。积分球体的内径为 2200 mm,积分球出光口径为 800 mm。积分球内部涂层采用聚四氟乙烯整体压制法。积分球光源采用两台 7000 W 大功率氙灯光源,氙灯光源在紫外波段能量高,可满足实验室紫外波段定标需求。

由(6)式可知,为了减小开口比,本文将氙灯外置,引入深椭球反光碗,将氙灯放置在反光碗第一焦点 f_1 处,能量在第二焦点 f_2 处会聚成光斑,如图 2 所示。将第二焦点设置在积分球的入口处,并利用导光筒将反光碗收集的光导入积分球,从而最大限度减小开口比。两台外置氙灯光源关于积分球口中心对称,以此保证出口光的均匀性。电动光阑安装

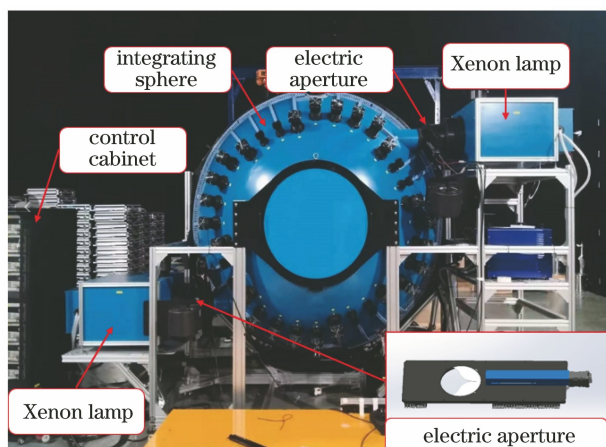


图 1 积分球的结构

Fig. 1 Structural diagram of integrating sphere

在外置氙灯与积分球体之间,氙灯光束通过电动光阑进入到积分球内部。电动光阑可以实现 4 个量级的大动态范围调节,可满足微光模式辐射定标。采用强制风冷散热,电动光阑含耐高温隔热材料,适用于大功率高温场合。

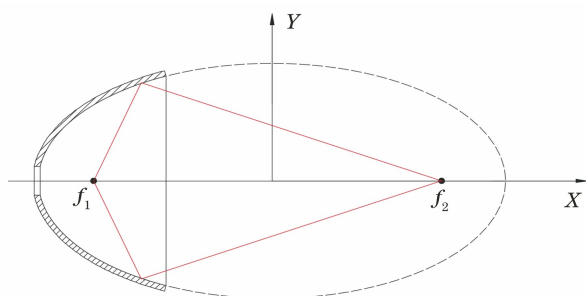


图 2 椭球反光镜的工作原理

Fig. 2 Working principle of ellipsoidal reflector

3.2 积分球涂层的压制工艺

聚四氟乙烯涂层在紫外波段的反射率相较于其他材料较高,在 250 nm 处反射率达到 97% 以上,如图 3 所示。在荧光效应方面,压制聚四氟乙烯涂层比烧结聚四氟乙烯涂层具有更小的荧光效应,是理

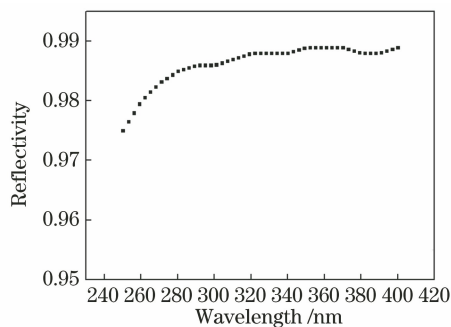


图 3 压制聚四氟乙烯涂层的反射率曲线

Fig. 3 Reflectivity of pressed PTFE coating

想的紫外辐射源涂层。但是如何将聚四氟乙烯涂层附着在球壳内表面是一个亟待解决的难题。通常情况下,聚四氟乙烯颗粒在一定的压强(通常取 3.25 MPa)下,依靠范德瓦耳斯力吸附在内球表面,形成涂层。我们采用封闭式压机原理,利用作用力与反作用力,结合已有的专利压制技术工艺,将 25 mm 厚度涂层整体压制成型。与以往涂层拼接技术相比,新工艺涂层具有无缝、均匀性好、内表面球面度好(内球面直径误差小于 0.23%)和附着力强等优点,如图 4 所示。



图 4 压制的积分球涂层

Fig. 4 Pressed coating of integrating sphere

4 测试数据

4.1 高亮度紫外积分球的辐亮度定标

采用灯板系统对光谱仪进行响应度定标。如图 5 所示,将标准灯及光阑安装在光学导轨上,光学导轨垂直于漫反射板的表面,灯丝面与漫射板表面保持平行,通过刻度尺测量,保证灯丝与漫反射板的距离为 500 mm。光谱仪的镜头轴线与漫反射板的法线成 45° 夹角。标准灯在恒定电流模式下工作,串联有标准电阻 0.001 Ω,电压为直流(DC)110 V,电流值调整为 8.1 A。预热 20 min 后进行测量。光阑用于减少杂散光对测试结果的影响。我们使用的高光谱辐射计是美国 OceanOptics 公司生产的海洋光谱仪(型号 FLMT03653),设置积分时间为

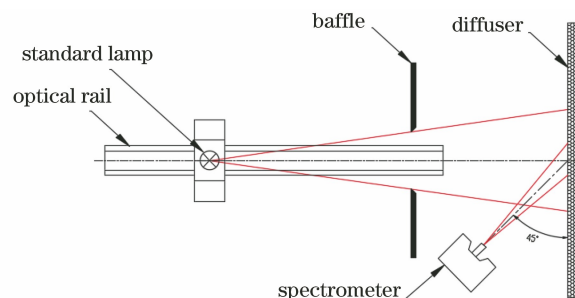


图 5 灯板系统的定标示意图

Fig. 5 Schematic of calibration of lamp-board system

20 ms, 采集 36 条数据, 求平均后输出 10 条。

利用响应度定标后的光谱仪对紫外积分球进行定标, 按照(8)式计算积分球辐亮度。调整海洋光谱仪的积分时间^[9], 使其与测量标准灯时的积分时间一致, 如图 6 所示。

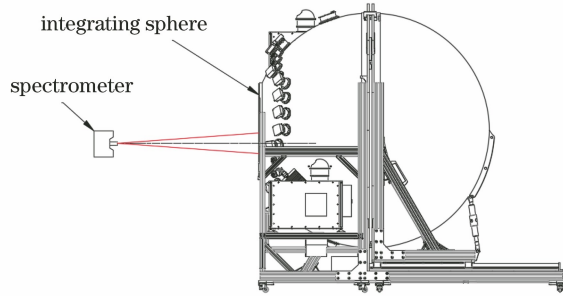


图 6 利用光谱仪对积分球定标

Fig. 6 Calibration of integrating sphere by spectrometer

1000 W 辐照度标准灯在 500 mm 处的辐照度值由中国计量科学研究院提供, 辐照度值如图 7 所示。紫外积分球在 250~400 nm 波段处的光谱辐亮度测试结果如图 8 所示, 这里将大气外太阳光谱辐照度转换为地表朗伯反射辐亮度, 并将结果与测量结果进行对比, 积分球在 250 nm 处的辐亮度值为 $0.54 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 在 250~278 nm 处的辐亮度值低于 1 个太阳常数; 在 279~295 nm 处的辐亮度值接近 1 个太阳常数; 在 296~400 nm 波段处的辐亮度值高于 1 个太阳常数, 且在 400 nm 处的辐亮度值为 $111.44 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$, 达到了 2.1 倍的太阳常数。

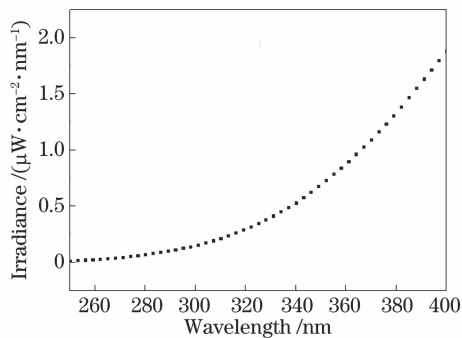


图 7 标准灯在 500 mm 处的辐照度

Fig. 7 Irradiance of standard lamp at 500 mm

4.2 面均匀性检测

积分球作为辐射标准光源, 能提供近似朗伯辐射体的大面积均匀亮度源, 因此积分球出光口的面均匀性是一项非常重要的指标^[10-11]。面非均匀性主要是点光源照度与距离平方成反比造成的。本文研制的积分球开口面积之和(含出光口、灯座孔、风扇孔及外置氙灯导光孔的面积)与积分球内表面积之

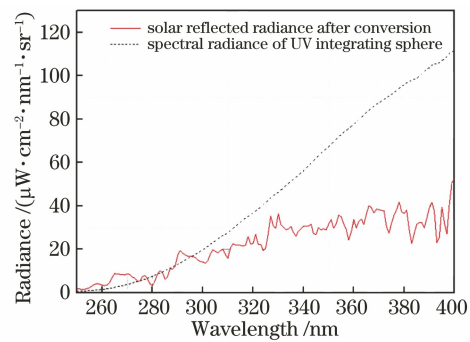


图 8 紫外积分球的光谱辐亮度与转换后的太阳反射辐亮度对比

Fig. 8 Comparison between spectral radiance of UV integrating sphere and solar reflected radiance after conversion

比约为 4.73%, 接近常规的开口比上限 5%, 通常情况下可以认为积分球内光源近似是一个点光源。点光源是辐照度源, 空间中点光源外任一点的辐照度与该点与点光源的距离平方成反比, 即距离平方反比定律。所以积分球内壁的一次反射光会随着球壁位置的不同而改变, 面对出光口, 靠近光源的位置相较于其他位置辐亮度值偏高。此外, 球内各种开孔也对非均匀性有一部分贡献。这是导致积分球出光口出射辐亮度不均匀的主要原因。因此, 为了减小以上两种因素的影响, 可以考虑提高内部涂层的反射率, 减小一次反射光的占比, 将积分球光源对称布置并尽量减少不必要的球内部开孔。

我们利用电动平移台, 在积分球口处搭建可沿水平方向及竖直方向移动的二维扫描装置, 在积分球出光口处选取 69 个点进行测量, 这 69 个点围绕出光口中心均匀分布, 每两个点之间的距离为出光口直径的 1/10, 如图 9 所示。

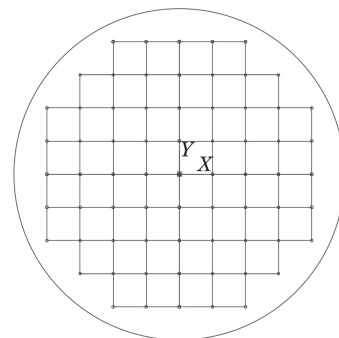


图 9 面均匀性的检测点阵

Fig. 9 Detection lattice of surface uniformity

测量探测器采用 1° 视场, 非均匀性计算公式为

$$u = \frac{D_{\max}(i', j') - D_{\min}(i', j')}{2 \times \bar{D}(i', j')} \times 100\%, \quad (12)$$

式中: u 为非均匀性; $D_{\max}(i', j')$ 为积分球出光口区

域(i', j')点处的最大测量值; $D_{\min}(i', j')$ 为积分球出光口区域(i', j')点处的最小测量值; $\bar{D}(i', j')$ 为积分球出光口区域(i', j')点处的测量值平均值。

测量时我们点亮积分球右侧上方的单个外置氙灯光源,如图 1 所示,得到的均匀性数据分布如图 10 所示。此外,我们采用高光谱辐射计对 230~400 nm 波段进行了非均匀性测量,如图 11 所示,在 230~400 nm 波段,非均匀性呈逐渐减小趋势,即面均匀性随波长的增加逐渐变好。在 250 nm 处,面非均匀性为 0.81%,在 400 nm 处,面非均匀性为 0.64%;在 230~280 nm 波段,面非均匀性的波动较大,且非均匀性在 0.7% 以上。面非均匀性波动较大主要是该氙灯光源在紫外波段的稳定性、信噪比及荧光效应等综合因素引起的。在 230~280 nm 波段,信噪比为 55:1~205:1 且信噪比随波长的增大而逐渐增加,在 283~400 nm 波段,信噪比大于 250:1。面非均匀性的峰值出现在 246 nm 处,为 0.94%;在 280~400 nm 波段,面均匀性随波长的增大波动减小,整体趋势逐渐变小。也就是说随着波长从紫外波段增加到可见波段,积分球出光口的面均匀性逐渐变好。通过(11)式,计算得到 380 nm 处积分球出光口的面非均匀性为 0.65%,即面均匀性为 99.35%。

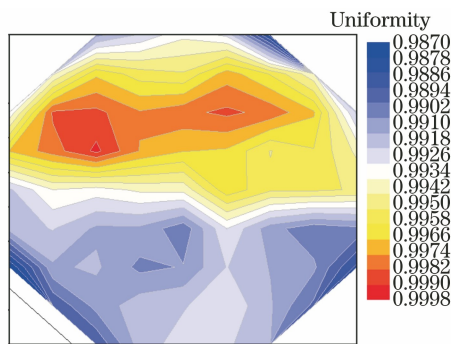


图 10 面均匀性的分布

Fig. 10 Surface uniformity distribution

在 250~400 nm 波段,面非均匀性分布近似;在 250 nm 之前的波段,面非均匀性的分布有所不同,积分球出光口的上部和下部的测量值相较于其他位置均较高;在 210 nm 波段,测量最大值在远离光源的下部。

图 3 给出了压制聚四氟乙烯涂层在 250~450 nm 处的方向半球反射比,结合图 11 可知,在 250~400 nm 波段,面非均匀性随反射率的增加减小了 0.17 个百分点。求解面均匀性与半球反射比,计算得到 250~400 nm 波段的相关系数为 0.93,初

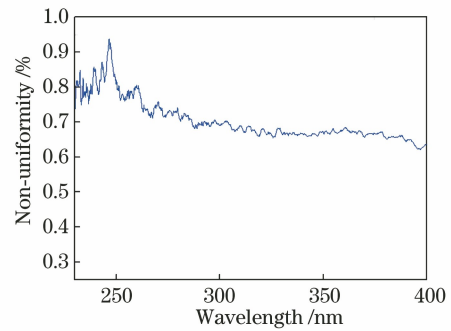


图 11 面非均匀性随波长的变化

步表明两者有强相关性,即涂层反射率越高,面均匀性就越好。

4.3 角均匀性检测

积分球之所以能够作为朗伯辐射源,另一个原因是它能满足各方向的光亮度均相同的需求,这种辐射体的另一个重要特性就是余弦特性^[12]。我们搭建专用的角均匀性测试平台,平台上的探测器可沿半圆弧形轨道偏转,探测器轴线与出光口法线成 $\pm 30^\circ$ 夹角。圆弧形轨道可分别安装在垂直方向、水平方向、 45° 方向及 -45° 方向,探测器分别沿 4 个方向,如图 12 所示。绕着出光口中心沿给定方向旋转 $\pm 30^\circ$,进行角非均匀性测量,每个方向选取包含法线位置(0° 角位置)的 13 个点,探测器采用 1° 视场,各点测量值为

$$\xi = \left(\frac{V_\theta}{V_{0^\circ}} - 1 \right) \times 100\%, \quad (13)$$

式中: ξ 为角非均匀性; V_θ 为角度 θ 位置的探测器的测量值; V_{0° 为法线位置(0° 角位置)处的探测器的测量值。

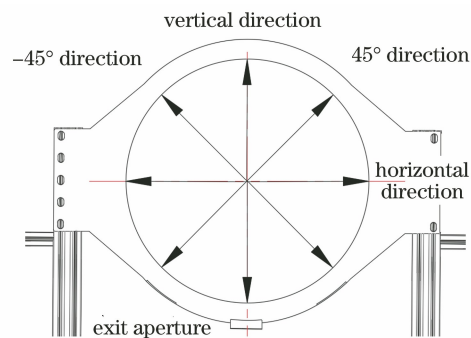


图 12 角均匀性的测量方向

Fig. 12 Measurement directions of angular uniformity

单开右侧上部外置氙灯(图 1),当每个方向的扫描夹角为 $-20^\circ \leq \theta \leq +20^\circ$ 时,380 nm 处水平方向上的角非均匀性为 0.49%,垂直方向上的角非均匀性为 0.40%, 45° 方向上的角非均匀性为 0.69%,

-45°方向上的角非均匀性为 0.68%，如图 13 所示。沿水平方向测量，当探测器与出光口法线夹角大于 0°时，探测器视场逐渐向氙灯光斑靠近，所以角非均匀性随夹角的增加而变大。±45°方向上的角非均匀性比水平与垂直方向大，这与实际情况吻合。

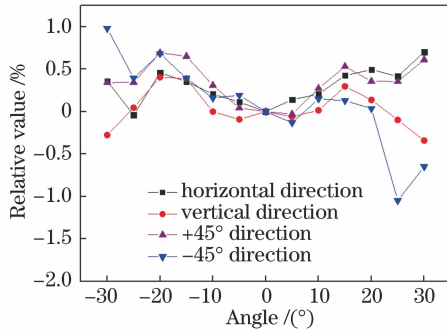


图 13 380 nm 处水平、垂直及±45°方向上的角非均匀性
Fig. 13 Angular non-uniformities at 380 nm in horizontal, vertical, and ±45° directions

角均匀性测试平台使用的探测器为高光谱探测器，测量波段为 200~450 nm，我们研究了右侧氙灯水平方向上的角非均匀性，采集了不同角度同一时刻不同波段的角非均匀性测试数据。除 230 nm 外，其他波段的角非均匀性均随着波长的增加而减小，如图 14 所示。即角均匀性在 250~400 nm 波段范围内随波长的增加而逐渐变好，角非均匀性由 1.04% 下降到 0.63%；在 230~280 nm 波段，角非均匀性测量值随波长的变化波动较大。280~400 nm 波段，角均匀性趋于稳定值，如图 15 所示。

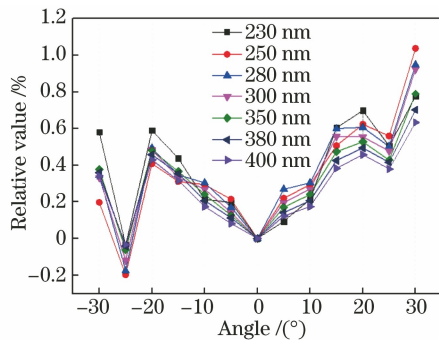


图 14 水平方向不同波段的角非均匀性测量值
Fig. 14 Measured angular non-uniformities at different wavebands in horizontal direction

同一位置处的角非均匀性在 280~400 nm 范围内呈现出随波长的增加而逐渐减小的趋势，也就是说同一位置处的角均匀性从紫外波段到可见光波段逐渐变好。在水平方向上，以与出光口法线成 5° 夹角的位置为例，该位置在 280 nm 处的角非均匀性为 0.17%，在 400 nm 处的角非均匀性为 0.08%，

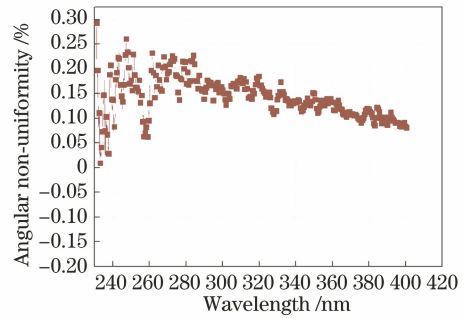


图 15 5° 夹角位置处角非均匀性随波长的变化曲线
Fig. 15 Variation curve of angular non-uniformity with wavelength at 5° angle

下降了 0.09 个百分点。这种变化在大于 20° 的位置处更加显著，如图 16 所示，与出光口法线成 25° 夹角的位置在 280 nm 处的角非均匀性为 -0.18%，在 400 nm 处的角非均匀性为 -0.03%，下降了 0.15 个百分点。

在进行角均匀性和面均匀性测量时，我们采用多次测量取均值的方式，尽量减少光源稳定性对结果带来的影响，每个测量点采集 10 条数据，且每条数据为 36 次采集取均值后的输出。由(13)式，求解得到 25° 位置处的角均匀性与涂层方向的半球反射比的相关性系数为 0.89，结合图 16 与图 3，可以初步得出角均匀性随光谱反射率的增加而变好，这种表现与面均匀性一致。但需要说明的是，角均匀性与波长随角度位置的改变是不同的，所以不同位置处的角均匀性与光谱反射率的相关性需要进一步研究。

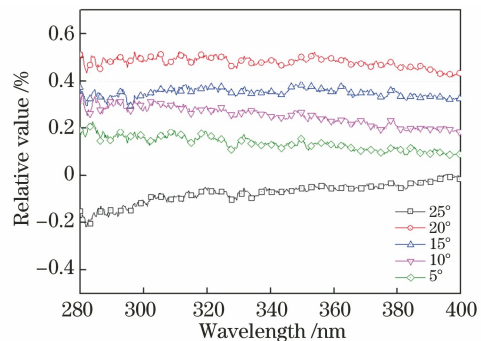


图 16 不同角度下角非均匀性随波长的变化
Fig. 16 Variation of angular non-uniformity with wavelength at different angles

4.4 积分球等色温调节及输出辐亮度的稳定性

高亮度紫外积分球辐射源的外置氙灯光源配备具有大动态调节范围的电动光阑，通过该光阑可实现 4 个量级的光通量调节。我们采用光谱仪研究了积分球紫外波段电动光阑的动态调节范围对积分球

色温的影响。如图 17 所示,当电动光阑完全打开时,外置光源的光全部进入到积分球内。光阑开度表示不同开度光阑的测量值与光阑全开时的测量值的比值,光阑开度分为 9 个等级,1 级为光阑全开,其他等级依次减小,9 级为最小开度。测试数据表明,随着光阑开度逐渐减小,入射到大球内部的光通量减小,积分球的色温变化量逐渐增加,色温变化采用标准偏差比均值来衡量。当光阑衰减到 10^{-2} 量级时,色温变化约为 1.65%;当衰减到 10^{-3} 量级时,色温变化约为 3.32%。越靠近紫外波段,色温变化越大。这主要由以下原因造成。1) 衰减后的紫外光相较可见光能量低,探测器在紫外波段的响应度低,紫外波段测量的不确定度大^[13-14]。2) 氙灯自身的稳定性。氙灯属于气体发光光源,稀有气体在高电压激发下在两电极间出现弧光放电,电弧的飘移也成为影响稳定性的重要因素,所以氙灯的稳定性相较于卤钨灯偏低。

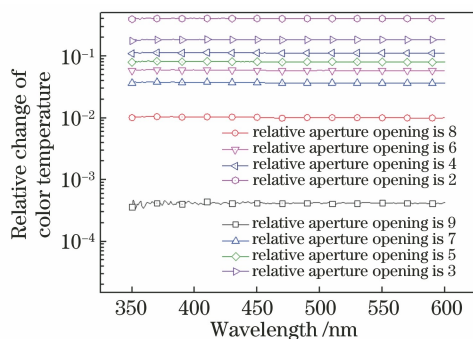


图 17 积分球光源的色温相对变化随光阑开度的变化

Fig. 17 Variation of relative change of color temperature of integrating sphere with aperture opening

积分球辐射输出的稳定性同样是衡量积分球性能的重要指标,可用 1 h 内其输出的相对变化的标准偏差比均值(也称为非稳定性)进行度量,测量结果如图 18 所示。可以看出,氙灯光源在监测的 1 h 内的非稳定性为 0.23%,稳定性良好。

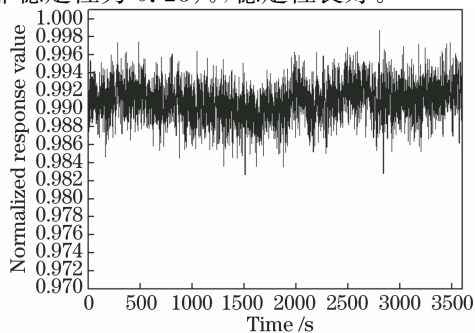


图 18 积分球输出辐亮度的稳定性

Fig. 18 Stability of integrating sphere output radiance

4.5 荧光效应

我们对积分球外置氙灯开启 60 min 内的 250~400 nm 紫外波段进行了监测。结果显示,在开启氙灯后的 10 min 内,300 nm 附近的测量值快速升高;在 20 min 左右,数据开始小幅波动并趋于平稳;在 30~60 min 范围内,紫外波段的光谱分布稳定。从测试数据来看,280 nm 附近的数据变化最大,变化量为 1.25%,如图 19 所示。聚四氟乙烯涂层受到紫外光照射,激发的荧光效应引起了这种变化^[3]。通过多次测量,我们发现,每次开启氙灯光源均会产生荧光效应,这种影响在 20 min 后稳定,结合氙灯点亮后需要 30 min 的预热稳定,我们建议紫外积分球在开灯 30~60 min 后再进行相关测试工作。

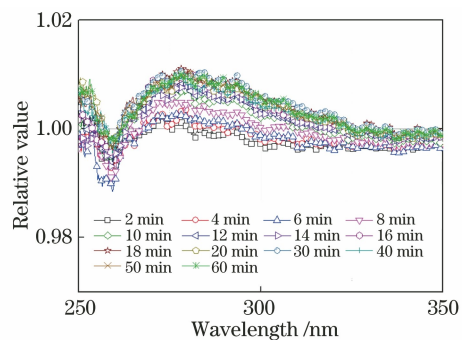


图 19 荧光效应对紫外波段的影响

Fig. 19 Influence of fluorescence effect on ultraviolet band

4.6 高亮度紫外积分球的温度变化

聚四氟乙烯粉末的熔点为 $(325 \pm 5)^\circ\text{C}$,被广泛应用于高分子材料领域,可以在 $-190 \sim 300^\circ\text{C}$ 范围内正常使用。本文对积分球的热平衡进行了检测,紫外积分球除外置氙灯光源外,还有 24 只 400 W 卤钨灯,8 只 50 W 卤钨灯,总功率为 10 kW。卤钨灯在可见近红外波段的能量远高于氙灯,所以本文以 10 kW 卤钨灯为测试对象,对该大型紫外积分球进行了连续 2 h 的热平衡测试。为了监控积分球内部温度,考虑热气流上升,我们在球壳顶部安装了温度监测及报警装置,如图 20 所示。当球内部温度超过 40°C 时会发出蜂鸣警报,此时应关闭积分球光源,以避免过高温度对实验数据准确性的影响。为了提高热交换效率,每个灯座上装有散热片以增大散热面积,并配有单独冷却风扇,球壳上方及下方各装有大功率冷却风机,快速交换球内热气流。测试数据如图 21 所示,环境温度为 25°C ,前 10 min 球内部的温度快速上升,随后热量逐步达到平衡,温度在 25 min 左右接近温度平衡点,最终温度稳定在

(39 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ ，这与球壳及灯座上的冷却风机的美好制冷效果密不可分。该温度与积分球光源预热后正常测试的温度相差不大，因此积分球的各项性能变化包括稳定性的变化是可以忽略的。该温度不会对球体内部涂层产生破坏，表明该大型紫外积分球的冷却系统满足使用要求。

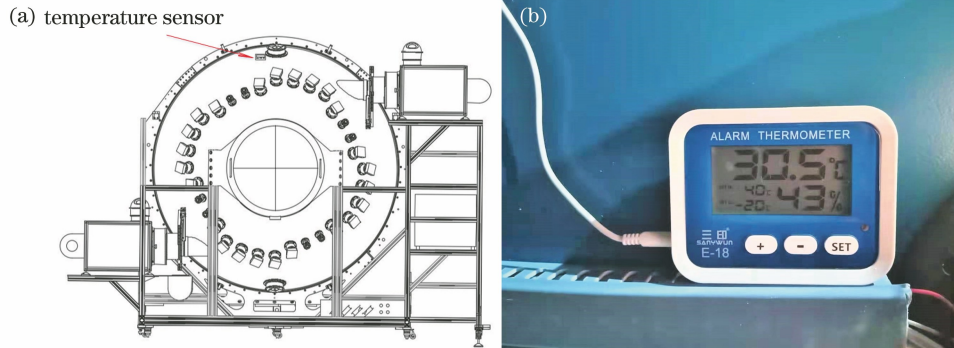


图 20 温度传感器。(a)安装位置；(b)实物

Fig. 20 Temperature sensor. (a) Installation position; (b) real object

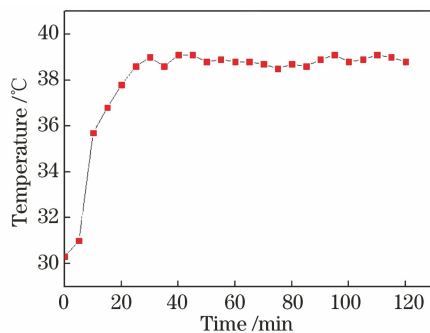


图 21 积分球球内温度的测试结果

Fig. 21 Temperature measurement in integrating sphere

5 不确定性评估

本文测量数据的置信水平为 95% (包含因子 $K=2$)，不确定度主要来源于灯板系统和积分球系统，表 1 已经详细列出各测量不确定度的来源。

灯板系统产生的不确定度主要包括标准灯及漫射板两个部分。所采用的定标源是由中国计量科学研究院标定并提供的 1000 W 标准卤钨灯 F1017，其在 250~400 nm 波段范围内的测量不确定度为 2.1%~1.1%。漫射板的方向半球反射比为分光光度计测量得到，分光光度计中的标准参考板溯源于中国计量科学研究院，测量不确定度为 1%，灯板距离的测量误差为 0.2%。

积分球不确定度包括积分球面非均匀性，前面已经给出，测量时光谱仪光轴垂直于积分球出光口所在平面，所以仅考虑 $\pm 10^{\circ}$ 对应的角非均匀性。氙

当外部环境温度过高或冷却系统故障导致热交换不畅时，积分球内部温度出现异常，球内部的温度可能高于 40°C ，温度报警器发出警报，我们建议此时应该关闭积分球光源，待温度恢复正常后再次开启使用，从而避免过高温度对测试结果的精度产生影响。

灯光源稳定性的影响前面也已经给出。

光谱辐射计的响应非线性为 1.0%，定标过程中紫外波段的辐亮度与灯板系统的亮度在同一水平，所以海洋光谱仪的非线性可以忽略。

整个定标过程均在暗室中进行，暗室消光材料采用自主研发的光吸收率为 98.5% 的消光布，杂散光引入的不确定度为 0.5%。标准灯的照度值及海洋光谱仪的测量值是通过插值得到的，其不确定度为 0.27%^[15]。

6 结 论

研制了内径为 2.2 m、出光口径为 0.8 m 的采用全压制聚四氟乙烯涂层的高亮度大口径紫外积分球辐射源。对各项性能指标进行了检测，结果表明各项性能指标优异。在 380 nm 处，面均匀性达到 99.35%，角非均匀性在 4 个方向上均优于 0.69%。此外，采用高光谱辐射计开展了光谱反射率与面均匀性及角均匀性的关系研究。结果表明，在 250~400 nm 波段，面非均匀性下降了 0.17 个百分点，面均匀性随波长的增加而逐渐变好；角非均匀性也呈现出随波长的增加而逐渐减小的趋势，这种趋势在大于 20° 夹角时更加明显，在 280~400 nm 波段下降了 0.15 个百分点。结合 PTFE 的光谱反射率，经过数据分析及相关性计算，可初步得出，面均匀性及角均匀性都随着光谱反射率的增加而提高。说明积分球采用的 PTFE 高光谱反射率涂层的必要性和重要性。

表 1 测量不确定度

Table 1 Uncertainty of measurement

unit: %

Source of uncertainty	Wavelength of 250 nm	Wavelength of 280 nm	Wavelength of 300 nm	Wavelength of 350 nm	Wavelength of 380 nm	Wavelength of 400 nm
Lamp-board system	2.37	2.37	2.37	1.55	1.55	1.55
Spectral irradiance of standard lamps	2.10	2.10	2.10	1.10	1.10	1.10
Reflectance of diffuse board	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Distance (500 mm) measurement	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Repeatability	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.20
Integrating sphere system	0.89	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70
Surface non-uniformity	0.81	0.72	0.69	0.67	0.65	0.64
Angular non-uniformity	0.29	0.30	0.27	0.24	0.21	0.17
Xenon lamp stability	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Stray light	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Interpolation	0.57	0.57	0.57	0.27	0.27	0.27
Non-linearity of ASD	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Combined standard uncertainty	2.64	2.62	2.61	1.81	1.80	1.79
Expanded uncertainty($K=2$)	5.28	5.20	5.22	3.62	3.6	3.58

采用基于辐射源的定标方法,测得该积分球在 250 nm 处的辐亮度为 $0.54 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$, 扩展不确定度为 5.28% ($k=2$); 在 280~400 nm 波段, 辐亮度大于 1 个太阳常数, 在 400 nm 处, 辐亮度值为 $111.44 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$, 达到了 2.1 倍的太阳常数, 扩展不确定度为 3.58% ($k=2$)。配备具有大动态调节范围的电动光阑, 可实现亮度的 4 个量级无极可调。此外, 还对外置氙灯光源的稳定性、荧光效应及积分球系统的热平衡进行了测试研究。

聚四氟乙烯压制涂层在 250~400 nm 紫外波段的光谱反射率在 96% 以上, 其制成的大型积分球辐射源是大面积均匀郎伯面源, 聚四氟乙烯压制涂层是理想的紫外辐射源涂层。所研制的大型积分球辐射源为大口径航天载荷短波至 250 nm 波段的实验室定标提供了标准辐射源, 为大口径航天载荷紫外波段辐射定标的发展提供了有力保障, 对紫外遥感定量化的发展有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Liu H, Zhao W Q, Yan J Y, et al. UV LED measurement and prospect [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(2): 6-10.
刘慧, 赵伟强, 闫劲云, 等. 紫外 LED 与计量技术 [J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 6-10.
- [2] McKee G, Pal S, Seth H, et al. Design and characterization of a large area uniform radiance source for calibration of a remote sensing imaging system [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6677: 667706.
- [3] Shaw P S, Li Z G, Arp U, et al. Ultraviolet characterization of integrating spheres [J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 5119-5128.
- [4] Che N Z, Yan D Y. Radiometry and photometry [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990: 207-213.
车念曾, 阎达远. 辐射度学和光度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 207-213.
- [5] Liu H, Chen H Y, Li J W, et al. Large dynamic range radiation standard transmission research based on integrating sphere source [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0804002.
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): 0804002.
- [6] Sun J X, Zhang H Z. Thermal design for a kind of high-light-level integrating sphere calibration source [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0312002.
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): 0312002.
- [7] Yuan Y L, Xu J, Zhai W C, 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): 0712004.
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): 0712004.
- [8] Yue Z G, Liu F, Zhao G J, 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]. 光学与光电技术, 2014, 12(4): 52-55.
- [9] Huang L K, Wen Q, Wen Z Y, et al. Micro-ultraviolet spectrometer analysis system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 053003.
黄良坤, 温泉, 温志渝, 等. 微型紫外光谱仪分析系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 053003.
- [10] Yuan Y L, Zheng X B, Wu H Y, et al. Uniformity research of integrating spheres reference light source with large exit aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 0422003.
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 大口径积分球参考光源的均匀性研究[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 0422003.
- [11] He Y W, Li P, Wu H P, 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.
- [12] Ye K, Yang L, Zhen X Q, et al. Design and implementation of visibility measurement system based on integrating sphere light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240104.
叶开, 杨玲, 甄小琼, 等. 基于积分球光源的能见度测量系统设计及实现[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240104.
- [13] Wang R, Wang S R, Li F T, et al. Investigation on radiation calibration system of vacuum ultraviolet detector[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1026-1030.
王锐, 王淑荣, 李福田, 等. 真空紫外探测器辐射定标研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1026-1030.
- [14] Yang X H, Wang S R, Qu Y, et al. Research of UV spectral radiance characteristics of the integrating sphere based on calibration by the absolute radiance radiometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(10): 1008007.
杨小虎, 王淑荣, 曲艺, 等. 基于绝对辐亮度计定标的积分球紫外光谱辐射特性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008007.
- [15] Kbarsepp T, Krh P, Manoocheri F, et al. Spectral irradiance measurements of tungsten lamps with filter radiometers in the spectral range 290 nm to 900 nm [J]. Metrologia, 2000, 37(4): 305-312.