

超大口径均匀光源辐射性能设计与测试

张 钊^{1,2}, 李宪圣¹, 万 志¹, 孙景旭¹, 刘洪兴¹, 刘泽询¹, 王亚敏^{1,2}, 任建伟¹, 任建岳¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 目前光学遥感器向着大口径、宽视场的趋势发展,随着遥感器口径和视场的不断增大,需要与之对应的定标设备来满足其全口径全视场的定标要求。为此,研制了一套超大口径(3.2 m)均匀光源系统。首先基于积分球理论和黑体普朗克理论设计出口光谱辐射亮度,并利用 LightTools 软件对出口均匀性和朗伯特特性进行内置光源分布仿真设计。然后针对超大口径均匀光源辐射性能测试存在的问题,研制了一套基于阵列探测器的辐射性能测试装置,并应用校正算法进行一致性校正。最后利用新研制的设备对超大口径均匀光源进行测试实验,并对测试不确定度进行分析。结果显示:0.8 m 口径光源的光谱辐射亮度大于 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,3.2 m 口径光源的均匀性优于 98.362%,中心点 $\pm 45^\circ$ 范围内朗伯特特性优于 98.810%,数据表明新研制的超大口径均匀光源满足设计要求。

关键词 遥感;辐射定标;超大口径均匀光源;仿真设计;辐射性能测试;一致性校正

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0410003

Design and Measurement of Radiometric Performance of Ultra-Large Aperture Uniform Light Source

Zhang Zhao^{1,2}, Li Xiansheng¹, Wan Zhi¹, Sun Jingxu¹, Liu Hongxing¹,
Liu Zexun¹, Wang Yamin^{1,2}, Ren Jianwei¹, Ren Jianyue¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract At present, optical remote sensors are developing in the direction of large aperture and wide field of view. With the increase of the remote sensor's diameter and field of view, corresponding calibration devices need to be developed to meet the radiometric calibration requirements of full aperture and full field of view. Therefore, a ultra-large aperture (3.2 m) uniform light source system is developed. Firstly, the spectral radiance of exit aperture is designed based on the integrating sphere theory and Plank theory, and the LightTools software is used for the simulation design of the exit uniformity and Lambert properties of the built-in light source distribution. Then, a set of radiometric performance measuring devices based on multi-detectors is developed to solve the problem of ultra-large aperture uniform light source measurement. The calibration algorithm is applied to make multi-detectors consistent. Finally, the new device is applied in the testing experiment of ultra-large aperture uniform light source, and its test uncertainty is analyzed. The results show that the integrated spectral radiance of 0.8 m exit aperture is more than $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, the spatial uniformity of 3.2 m exit aperture is more than 98.362%, and the Lambert uniformity in central point of $\pm 45^\circ$ is more than 98.810%. The newly developed ultra-large aperture uniform light source meets the design requirements.

Key words remote sensing; radiometric calibration; ultra-large aperture uniform light source; simulation design; radiometric performance measurement; consistency calibration

OCIS codes 120.5630; 220.4830; 220.4840; 120.0280

收稿日期: 2016-12-06; 收到修改稿日期: 2016-12-26

基金项目: 国家 863 计划(863-2-5-1-13B)、国家自然科学基金(61405191)

作者简介: 张 钊(1989—),男,博士研究生,主要从事遥感器辐射定标方面的研究。E-mail: 250627410@qq.com

导师简介: 任建岳(1952—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学仪器设计方面的研究。E-mail: renjy@ciomp.ac.cn

0410003-1

1 引 言

朗伯体均匀光源在高精度大口径光学遥感器辐射定标中应用广泛,其中积分球应用最多。均匀光源可应用于遥感器焦平面测试、整机辐射定标、探测器相对定标等方面^[1]。目前我国光学遥感器实验室辐射定标的标准传递过程主要为:低温绝对辐射计—辐射亮度(辐射照度)标准探测器—积分球均匀光源—光学遥感器^[2]。积分球均匀光源在光学遥感器辐射定标中起着重要作用。随着遥感应用的深入,光学遥感器向着大口径、宽视场的方向发展^[3-7]。随着遥感器口径和视场的不断增大,需要有与之对应的定标均匀光源来满足新的定标需求^[8]。为满足定标光源与被定标光学遥感器之间充满口径、充满视场的定标要求,国内外研究者相继开展了许多针对大口径均匀光源的研究工作,近几年报道的大口径均匀光源的口径也逐渐增加,2010~2012年安徽光学精密机械研究所研制出了直径为2.5 m(口径为1 m)的均匀光源^[9],2012~2015年长春光学精密机械与物理研究所研制出了直径为3 m(口径为1 m)的均匀光源^[10-12],2015年至今国内外研究者相继研制出直径为4 m(口径为1.6 m)的均匀光源^[13-14]。随着光学遥感器的进一步发展,遥感器口径已从1 m量级发展为目前的1.5 m量级,即将发展至2~3 m量级。为此,本文研制了一套超大口径积分球均匀光源系统。

随着均匀光源尺寸的逐渐增加,为满足遥感器定标要求和条件,需要对超大口径均匀光源的辐射性能进行设计,主要考虑三个方面:1)出口光谱辐射亮度设计;2)均匀性设计;3)朗伯特特性设计。积分球出口光谱辐射亮度直接影响着被定标遥感器的工作谱段范围内积分辐射亮度值。若辐射亮度较低则不能覆盖遥感器在该谱段的动态范围,就会影响最后的辐射定标结果^[15]。均匀性和朗伯特特性不仅是评价均匀光源的重要依据,而且是影响遥感器相对辐射定标精度和绝对辐射定标效果的直接因素。以往积分球的设计(包括开口比、功率分布和位置分布等)多依赖于经验^[9-14],然而随着积分球尺寸的大大增加,需要在研制阶段进行仿真设计分析,保证研制的均匀光源辐射性能满足遥感器的定标要求。

随着积分球均匀光源口径逐渐增大,近年来对积分球的检测评价手段也有所改进,从以往利用单元探测器手动逐点测量发展到目前利用单元探测器自动逐点扫描测量^[15],由于采用16位探测器,并在每点采集辐射亮度值或辐射照度值,所以适用于高精度的科研级别测量^[16-19]。该方法对开口较小的积分球进行测试具有良好的效果,随着积分球口径的增加,需要更大数量的测试点进行统计计算,因此需要增加采集时间;但是,探测器和均匀光源长时间工作会输出漂移现象导致结果不准确,另外长时间点亮光源会对内壁涂层和内置光源寿命产生影响,因此需要对积分球的检测手段和方法做进一步改进和创新。本文研制了一套基于阵列探测器的测量系统,相比于传统方法,该方法可提高检测效率,避免人为和客观条件因素对测试结果的影响,能够保护内置光源,延长均匀光源寿命,适用于超大口径均匀光源检测,并且该方法具有普适性,对于其他均匀光源系统检测也完全适用。

2 超大口径均匀光源辐射性能设计

根据光学遥感器发展趋势和目前遥感器辐射定标要求,对超大口径积分球均匀光源研制提出的要求如表1所示。

表1 超大口径均匀光源研制要求

Table 1 Requirements of ultra-large aperture uniform light source

| Name | Requirement |
|--|--|
| Inner diameter | 8 m |
| Aperture diameter | 0.8 m; 2.5 m; 3.2 m |
| Sphere coating reflectance (0.3~1.0 μm) | >95% |
| Inner source power | 80 kW |
| Inner source type | Tungsten halogen |
| Color temperature | 3000 K |
| Integrated radiance (0.45~0.9 μm) for $\Phi 0.8$ m exit port | >600 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ |
| Internal monitor detector | HR2000+, Si detector |
| Spatial uniformity ($\Phi 3.2$ mm aperture) | >95% |
| Lambert uniformity | >95% |

根据光学传感器定标需求,本研究针对超大口径均匀光源的辐射性能设计主要包括:光谱辐射亮度设计、均匀性设计和朗伯特特性设计。

2.1 光谱辐射亮度设计

超大口径均匀光源光谱辐射亮度范围直接决定被定标光学传感器的工作波段范围。若均匀光源在传感器波段范围内输出的辐射亮度不能满足其动态范围,则会影响传感器的定标结果,因此需要在研制前对均匀光源出口进行光谱辐射亮度设计。根据积分球理论可知,积分球开口处的光谱辐射亮度由下式给出^[20]:

$$L_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{\pi A_s} \cdot \frac{\rho_{\lambda}}{1 - \rho_{\lambda}(1 - f)}, \quad (1)$$

$$f = \frac{A_p}{A_s}, \quad (2)$$

式中 λ 为波长, L_{λ} 为开口光谱辐射亮度, Φ_{λ} 为光源光谱辐射通量, ρ_{λ} 为积分球涂层的光谱反射率, f 为积分球开口比, A_s 为积分球内表面面积, A_p 为开口面积。内置光源选用光谱曲线平滑的卤钨灯, Φ_{λ} 可根据黑体辐射公式计算得到^[21]:

$$\Phi_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp[c_2/(\lambda T)] - 1} \cdot \frac{\Phi_0}{\sigma T^4}, \quad (3)$$

式中常数 $c_1 = 3.7413 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^{-2}$,常数 $c_2 = 1.4388 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, T 为光源温度, Φ_0 代表光源功率,常数 $\sigma = 5.6686 \times 10^{-20} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。根据(1)式可知,积分球涂料对出射光谱辐射亮度分布有很大影响,根据设计经验和实际测试结果,最后筛选出两种进口涂料(分别为 Spectralon 和 Spectralect),其光谱反射率实测结果如图 1 所示。

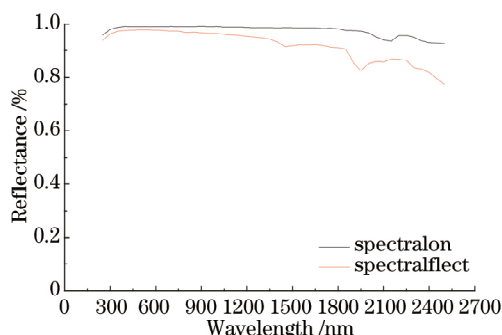


图 1 Spectralon 和 Spectralect 的光谱反射率曲线

Fig. 1 Spectral reflectance curves of Spectralon and Spectralect

根据图 1 分析可知,相比于 Spectralect, Spectralon 在短波红外范围的相对光谱反射率更高,但是 Spectralon 采用压面工艺,对于大面积内表面的积分球不可避免会产生压面拼接问题,而 Spectralect 采用喷涂工艺,可均匀附着于内表面,从而获得相对更稳定的光谱反射性能。同时根据不同传感器的口径需要,本设计的大口径均匀光源可选择三种尺寸的开口直径,分别为 0.8, 2.5, 3.2 m, 如图 2 所示。

根据(3)式设计光谱辐射亮度,主要考虑 0.45~0.9 μm 范围内最关心的 4 个谱段,分别为蓝谱段(0.45

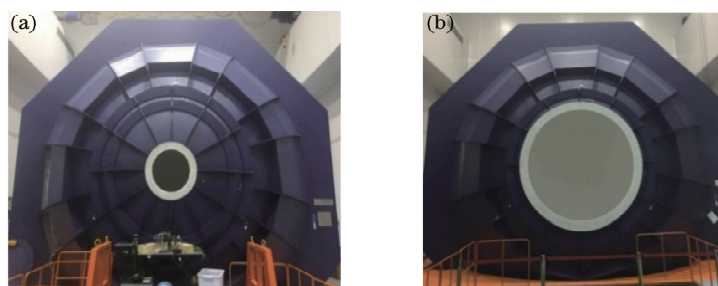


图 2 (a)0.8 m 口径和(b)2.5 m 口径超大口径均匀光源实物图

Fig. 2 Ultra-large aperture uniform light source with (a) $\Phi 0.8$ m aperture and (b) $\Phi 2.5$ m aperture

~0.52 μm)、绿谱段(0.52~0.60 μm)、红谱段(0.63~0.69 μm)和近红外谱段(0.76~0.9 μm)。根据(1)~(3)式并结合实测光谱反射率(图 1),以及波段积分公式

$$L_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda, \quad (4)$$

设计出 0.8 m 口径的光谱辐射亮度分布如图 3 所示,波段积分光谱辐射亮度值如表 2 所示。

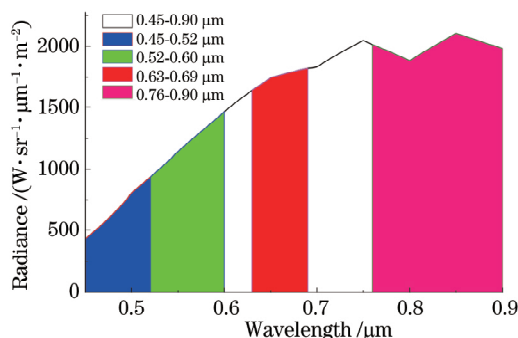


图 3 光谱辐射亮度设计结果

Fig. 3 Designed spectral radiance

表 2 不同谱段设计的积分辐射亮度值

Table 2 Integrated radiances of different wavebands

| Waveband / μm | Integrated radiance / (W·m ⁻² ·sr ⁻¹) |
|---------------|--|
| 0.45~0.90 | 711.44 |
| 0.45~0.52 | 62.8 |
| 0.52~0.60 | 96.4 |
| 0.63~0.69 | 105.29 |
| 0.76~0.90 | 279.87 |

2.2 均匀性和朗伯特特性设计

均匀光源内涂层并非理想朗伯体,同时内置光源开口也并非朗伯体,上述因素往往导致实际使用的均匀光源会与理想效果有偏差。另外以往内部光源分布设计多依据经验,然而本研究在针对超大口径均匀光源的内置光源功率分布和位置分布设计时,若凭经验则可能会造成研制出的系统的均匀性和朗伯特特性结果不达标,需要重新进行设计,从而造成时间和资源成本的浪费。本研究使用 LightTools 光线追迹软件,通过设置内置光源卤素灯和涂层反射率来对多种内置光学功率和位置分布进行模拟,通过设置接收器(均匀性为网格,朗伯特特性接收器为角度网格)追迹内置光源多种分布,每种分布追迹 40000000 条光线。通过接收机器得到的仿真数据计算每种分布的均匀性和朗伯特特性,选择出辐射性能最佳的分布组合,仿真结果如图 4 所示。

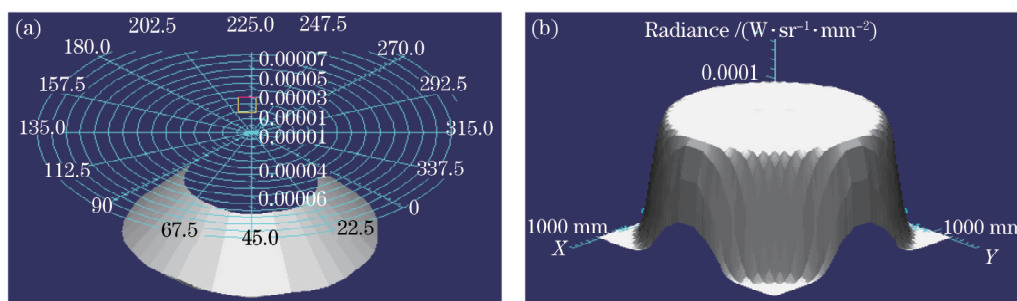


图 4 (a)朗伯特特性仿真结果;(b)均匀性仿真结果

Fig. 4 (a) Simulation result of Lambert characteristics ; (b) simulation result of uniformity

在理想条件下,积分球作为朗伯体均匀光源具有良好的辐射性能。但是在实际中,受内置光源分布、实际涂层喷涂厚度、光源所占面积为非朗伯发射体和内置光源挡板等因素的影响,研制出的积分球均匀光源会与理想状态有偏差,若偏差较大则会对光学遥感器定标结果产生影响,因此需要对均匀光源进行辐射性能测

试来评价其是否达到设计要求。

3 辐射性能测试原理

3.1 均匀性测试原理

积分球面均匀性代表积分球开口面内不同位置处的辐射亮度相对偏差程度,在测试中将 N 个有效测量点测试结果的相对标准偏差(STD)值与平均值相比得到。根据朗伯发射体理论,其辐射亮度在各方向均匀,国际上通常采用照度均匀性表示。其中辐射亮度 L_λ 与辐射照度 E 转化关系为

$$L_\lambda = \frac{\rho_\lambda \times E}{\pi}, \quad (5)$$

式中 ρ_λ 为光谱反射率。根据(5)式和上述均匀性定义,可得到照度均匀性公式^[22]

$$U_{\text{spatial}} = \frac{1}{\bar{L}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2} = \frac{1}{(\bar{E}\rho_\lambda/\pi)} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i\rho_\lambda}{\pi} - \frac{\bar{E}\rho_\lambda}{\pi} \right)^2} = \frac{1}{\bar{E}} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2} = \text{std}(D_i)/\bar{D} \times 100\%, \quad (6)$$

式中 L_i 代表有效测试点的辐射亮度, \bar{L} 代表辐射亮度平均值, E_i 表示测试点处辐射照度, \bar{E} 表示测试点辐射照度平均值, $\text{std}(D_i)$ 表示测试系统数码值相对标准偏差, \bar{D} 表示数码值。目前国内采用单照度计结合位移导轨系统对开口面内进行筛网点测试,如图 5 所示,最后选取有效测试点并利用(6)式计算得到均匀性结果。

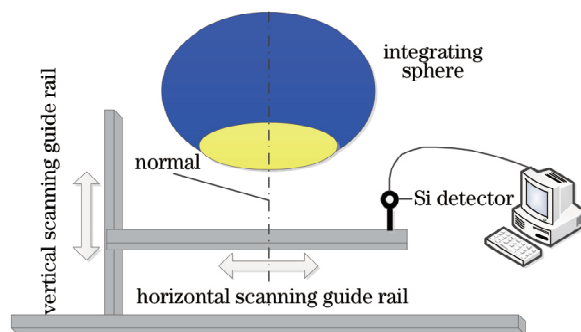


图 5 传统均匀性测试方法示意图

Fig. 5 Schematic of traditional uniformity test method

3.2 朗伯特特性测试原理

朗伯特特性代表了相对积分球开口面法线一定角度内的辐射亮度的偏移量,用测量多角度的辐射亮度值与开口面法线方向处亮度测量值的相对偏差来表示。通常将辐射亮度计放置在朗伯特特性测试架上以 β 角度间隔旋转探测器进行测量,测量角度为 $\pm\alpha$ 的立体角范围内的方向亮度。设开口面法线方向为 0° 位置的辐射亮度值为 L_0 ,各角度点采样辐射亮度值为 L_{θ_i} ,以各角度测量值相对 0° 位置测量值的偏移来表示该积分球在该位置处的朗伯特特性,即

$$u_{\text{angular}} = \min\left(\frac{L_{\theta_i}}{L_0}\right) = \min\left(\frac{D_{\theta_i}}{D_0}\right), \quad (7)$$

式中 u_{angular} 为朗伯特特性, D_{θ_i} 为各角度下采集的数码值, D_0 为 0° 下采集的数码值。传统朗伯特特性测试设备是利用单个硅亮度探测器进行测量,测量设备中将探测器安装在带有角分度的转台上,在固定测试点上旋转探测器测量不同空间立体角度下的辐射亮度值,每次测量保存积分球开口测试点位置、空间立体角度以及相对应的辐射亮度值,最后根据(7)式得到最终结果。传统朗伯特特性测试方法如图 6 所示。

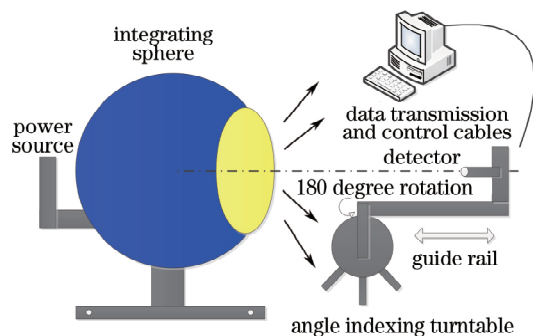


图 6 传统朗伯特特性测试方法示意图

Fig. 6 Schematic of traditional method of Lambert uniformity test

3.3 传统方法面临的问题

传统的测试方法中,对面均匀性和朗伯特特性的测试均采用单个探测器进行逐点扫描,其中面均匀性是通过单个照度探测器进行二维扫描得到待测面上所有测试点的数据,朗伯特性是通过单个亮度探测器进行角度扫描得到测试面上所有测试点的数据。传统测试方法对小尺寸出光面进行扫描时,可得到可靠的待测定光源的辐射特性数据,从而对其辐射特性进行定量评价。然而本研究中所研制的超大口径均匀光源的出光口径达到 3.2 m,如果仍使用该方法对其辐射特性进行测试,势必会造成一次测试时间过长,探测器和光源长时间工作会产生输出漂移进而导致测量结果不准确,同时会减少光源寿命,对内表面涂层性能也会产生影响,增加测试误差,最终也会影响均匀光源的实际使用效果。因此需要对超大口径均匀光源辐射性能的测试手段和方法进行改进和创新。

4 辐射特性测试装置研制

为提高超大口径均匀光源辐射性能测试效率,减小测试误差,延长均匀光源使用寿命,本研究设计了一套均匀光源辐射特性测试系统,该系统采用阵列型探测器结构,在保证获取均匀光源辐射性能实时数据准确性的前提下提高效率,减少长时间测试引入的各种影响。根据测试要求将该系统分为两部分:均匀性测试装置和朗伯特特性测试装置。

4.1 均匀性测试装置

均匀性测试装置主要由二维扫描机构、底座、水平垂直测试架和探测组件组成,由于积分球出口面积是以往的 4 倍左右,测量时间对于测试准确性影响很大,因此新设计的均匀性测试设备探测组件是由 10 个垂直排布照度探测器构成的阵列探测器,结构如图 7 所示。

阵列探测器在垂直方向上由 10 个间隔为 0.32 m 的照度计组成,垂直方向移动距离为 0.5 m,总长度为 2.88 m,水平方向移动距离为 3.5 m。测量时将阵列探测器光轴垂直于积分球出光口面,分别按照水平和垂直方向等间隔测试,进行二维平面内阵列模式扫描,如图 8 所示。

图 8 中填充黑色阵列探测器的位置为起始测量位置,虚线探测器为后续测量位置点,测试架在开口面内

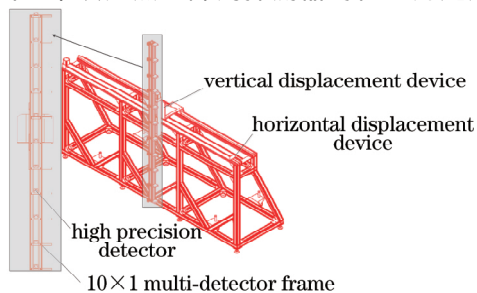


图 7 均匀性测试装置设计示意图

Fig. 7 Design sketch map of uniformity test unit

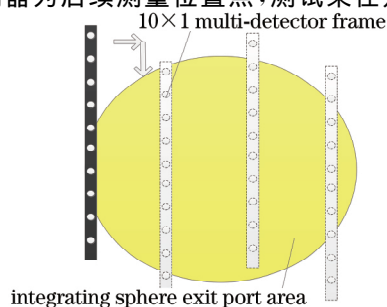


图 8 均匀性测试装置工作方式示意图

Fig. 8 Working diagram of uniformity test unit

扫描整个测试区域以保证测量面积覆盖开口面,在每个位置处测量 10 个垂直方向上间隔 0.32 m 的目标点处的照度值,然后位移到下一个待测点继续采集测试,最后把数据结果按照测量位置进行重新组合配位,最终得到整个平面的面均匀性结果。

4.2 朗伯特特性测试装置

新设计的朗伯特特性测试装置由水平位移导轨、垂直位移导轨和方位立体角旋转探测仪(包含 47 个辐射亮度探测器)组成,如图 9 所示。

图 9 中水平和垂直位移导轨控制旋转探测仪在水平和垂直方向上按照需要采集的积分球开口面上的待测点进行二维移动扫描,方位立体角旋转探测仪在每个待测点上旋转 180° ,以间隔 2° 旋转扫描,采集开口面 2π 空间范围内法线出射方向 $\pm 45^\circ$ 范围内各方向的辐射亮度值。探测系统由 47 个辐射亮度探测器、支撑桁架、框架、二维微调机构组成。为了保证朗伯特特性测试中 47 个探测器在 $\pm 45^\circ$ 范围内指向一致,在每个探测器处附加二维微调机构。固定点角度旋转测试原理如图 10 所示。

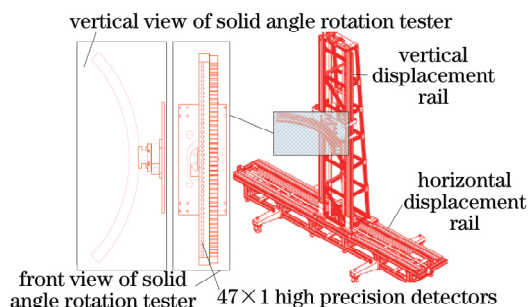


图 9 朗伯特特性测试装备示意图

Fig. 9 Schematic of Lambert characteristic test unit

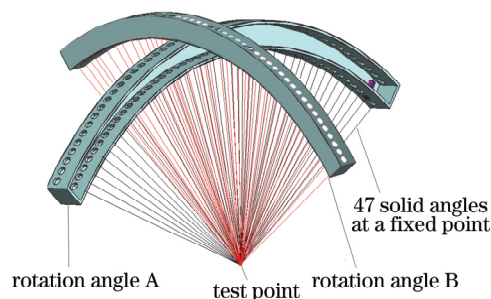


图 10 固定点朗伯特特性旋转测试示意图

Fig. 10 Schematic diagram of a fixed point Lambert characteristic test

积分球开口面朗伯特特性测试扫描方法如图 11 所示。

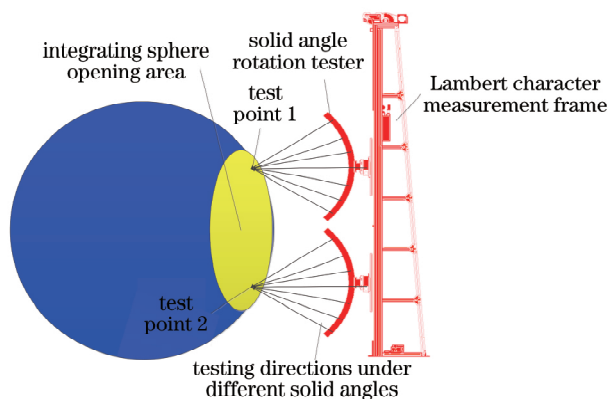


图 11 积分球开口面朗伯特特性测试方法示意图

Fig. 11 Integrating sphere exit port test model of Lambert characteristic test method

4.3 探测器

探测器选用硅探测器,使用硅探测器可以保证测量数据的稳定性和线性度,同时保证较高的信噪比,以适用于这种大面积、长时间的实验条件。辐射亮度探测器在传感器前安装孔径光阑和视场光阑,以保证积分球开口面朗伯特特性测试,前端安装的孔阑和视场光阑可以保证接收立体角,并且多次反射的入射光均能会聚到传感器光敏面内,提高信噪比。

4.4 阵列探测器一致性校正

由于测试时使用阵列探测器同时测试的方法,因此校正探测器的输出一致性尤为重要,直接影响最后结果的准确性。目前一致性校正算法主要有单点校正法、两点校正法和多点校正法。单点一致性校正法在不同亮度/照度下会产生较大的非一致性误差,而新研制的均匀光源提供的辐射亮度/照度范围较大,因此不适用于本

实验。多点校正算法虽然精度高,但由于其使用多项式插值算法,因此运算量大,更适用于非线性校正。由于硅探测器具有良好的线性度,因此本研究采用两点线性校正算法。将探测器等间隔放置于专门设计的一致性校正实验架上,置于积分球中心的均匀照明面(300 mm×300 mm 范围内,单探测器法实测均匀性大于99.5%)处,将光源亮度等级分为 M 段,每个测试系统的全部探测器在同一时间采集数据。实验如图 12 所示。

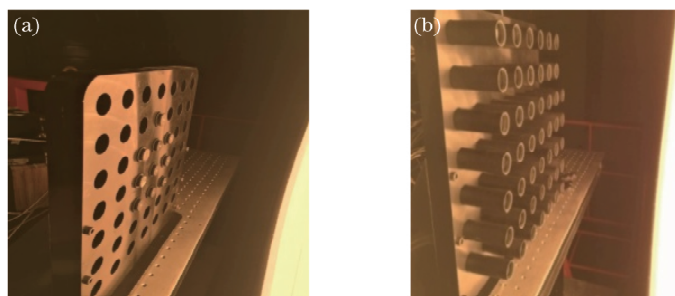


图 12 (a)均匀性测试探测器校正实验;(b)朗伯特特性测试探测器校正实验

Fig. 12 (a) Calibration experiment of uniformity test detector; (b) calibration experiment of Lambert test detector

以朗伯特特性测试系统为例,设探测器 1 号到 N 号在亮度等级 L_j 下的采集电压值为 $V_{j,i}$ ($j = 1, 2, \dots, M$; $i = 1, 2, \dots, N$)。每一个亮度等级都使用 PR-735 地物光谱辐射计采集光谱辐射亮度。图 13 为一致性校正实验中 16 个亮度等级下的光谱辐射亮度。

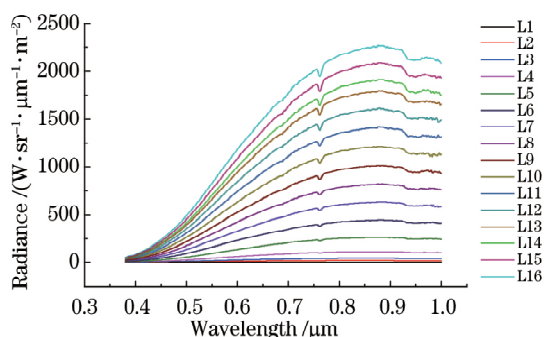


图 13 16 个亮度等级下的光谱辐射亮度测试值

Fig. 13 Spectral radiance test results of 16 brightness levels

在 $0.45 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段范围内对每一等级进行光谱辐射亮度波段积分,即可建立辐射亮度等级与探测器采集电压值的线性矩阵关系,

$$L_j = V_{j,i} \times r_i + b_i, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1,1} \times r_1 + b_1 \\ \vdots \\ V_{M,1} \times r_1 + b_1 \end{bmatrix} = \dots = \begin{bmatrix} V_{1,N} \times r_N + b_N \\ \vdots \\ V_{M,N} \times r_N + b_N \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 r_i 为每个探测器的响应度校正系数, b_i 为截距校正系数。 r_i 和 b_i 由 Cramer 公式计算得到

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^M V_{j,i} \times \sum_{j=1}^M L_j^2 - \sum_{j=1}^M L_j \times \sum_{j=1}^M L_j \times V_{j,i}}{M \times \sum_{j=1}^M L_j^2 - \left(\sum_{j=1}^M L_j \right)^2}, \quad (10)$$

$$b_i = \frac{M \sum_{j=1}^M L_j \times V_{j,i} - \sum_{j=1}^M L_j \sum_{j=1}^M V_{j,i}}{M \sum_{j=1}^M L_j^2 - \left(\sum_{j=1}^M L_j \right)^2}, \quad (11)$$

最终均匀性一致性校正结果为 99.69%,朗伯特特性一致性校正结果为 99.78%。

5 实 验

针对本研究研制的超大口径均匀光源系统,利用第 4 节设计的测试设备进行实验测试。实验分为三部分:1)出口光谱辐射亮度测试验证实验;2)均匀性测试实验;3)朗伯特特性测试实验。

5.1 光谱辐射亮度测试

本研究使用 PR-735 地物光谱辐射计进行光谱辐射亮度测试,该辐射计校准溯源于国防一级计量站,测试时通过目镜将测试视场垂直对准开口处中心(避免内置光源直射光进入视场),开启最高亮度等级并稳定一段时间后,测试 0.8 m 口径的光谱辐射亮度,结果如图 14 所示。

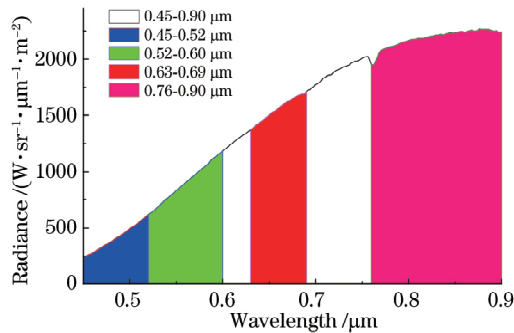


图 14 辐射计实测光谱辐射亮度结果

Fig. 14 Spectral radiance results measured by radiometer

实测结果满足表 1 所示光谱辐射亮度研制的要求。实际测试得到的光谱辐射亮度与 2.1 节设计的光谱辐射亮度有 10% 内偏差,如表 3 所示,这是由于光源位置为非朗伯面、内置光源挡板以及实际喷涂厚度对光谱反射率的影响等因素的。

表 3 各谱段设计和实测光谱辐射亮度值比较

Table 3 Comparison of designed and tested spectral radiance of different wavebands

| Waveband / μm | Designed integrated radiance / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) | Tested integrated radiance / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) |
|--------------------------|--|--|
| 0.45~0.90 | 711.51 | 671.92 |
| 0.45~0.52 | 62.79 | 47.61 |
| 0.52~0.60 | 96.39 | 72.09 |
| 0.63~0.69 | 105.31 | 93.95 |
| 0.76~0.90 | 279.91 | 306.62 |

5.2 面均匀性测量

利用新研制的均匀性测试装置测量超大口径均匀光源在不同口径下的均匀性,在最大口径 $3.2\text{ m}\times 3.2\text{ m}$ 范围内,测量开口面内 $320\times 320(102400)$ 的点阵,水平方向和垂直方向上的测量点间隔均为 10 mm。 3.2 m 口径测试实验时间为 2 h,在保证测试点数目情况下提高测试效率约 10 倍。图 15 为 100% 亮度等级下探测器归一化输出值曲面,图中 x 、 y 轴对应积分球开口二维平面位置坐标, z 轴为探测器归一化输出照度值。

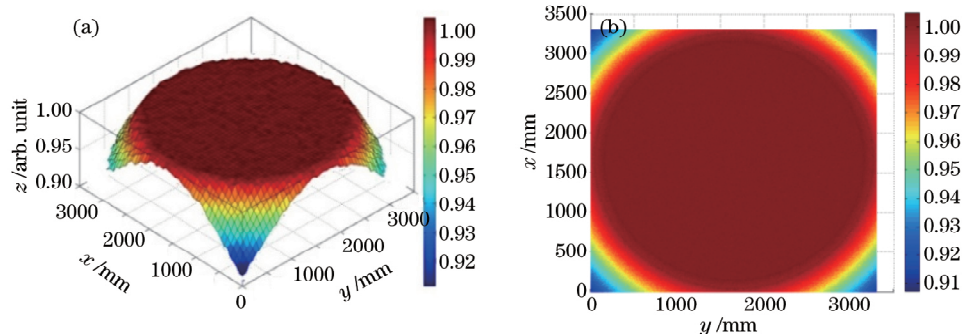


图 15 (a) 均匀性测试结果侧视图; (b) 均匀性测试结果俯视图

Fig. 15 (a) Oblique view of uniformity test result; (b) vertical view of uniformity test result

在最高亮度等级下分别选取 2.5, 2, 1, 0.8 m 口径的光源进行均匀性测量, 统计实验结果如表 4 所示。均匀性测试结果满足表 1 所示的研制要求。

表 4 不同口径光源的均匀性测试结果

Table 4 Uniformity test results of different aperture light sources

| Diameter / m | Uniformity / % |
|--------------|----------------|
| 0.8 | 99.69 |
| 1 | 99.42 |
| 2 | 98.96 |
| 2.5 | 98.65 |
| 3.2 | 98.36 |

5.3 朗伯特特性测量

利用新研制的朗伯特特性测试装置测量超大口径均匀光源的朗伯特特性。测试最高亮度等级情况下 3.2 m 口径中心区域范围内的朗伯特特性, 以 2° 间隔测量 π 空间范围内的朗伯特特性。单点测试时间为 1.5 min, 提高测试效率约 50 倍。得到的归一化辐射亮度值与测试立体角度间的关系如图 16 所示。在最高亮度等级下出口中心位置的朗伯特特性测试结果为 98.81%, 该测试结果满足表 1 所示的研制要求。

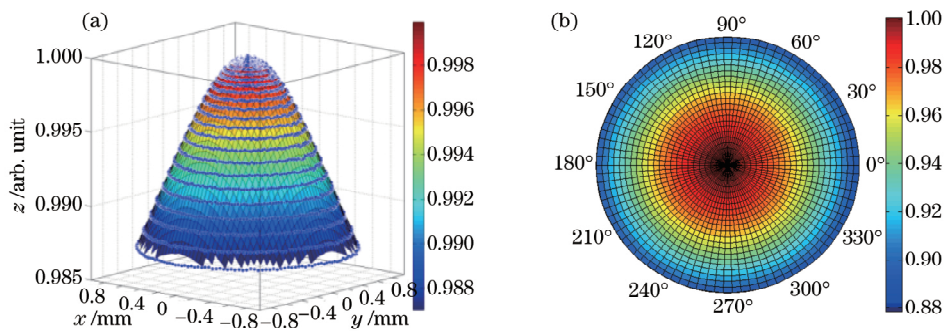


图 16 (a) 朗伯特特性测试结果侧视图; (b) 朗伯特特性测试结果俯视图

Fig. 16 (a) Oblique view of Lambert characteristic test result; (b) vertical view of Lambert characteristic test result

6 不确定度分析

超大口径均匀光源的面均匀性和朗伯特特性是直接评价其辐射性能不确定度的来源, 测量原理是在开口面内按照一定规律的抽样统计, 从二者的评价方法和公式来看, 二维扫描装置的定位准确度和旋转测试仪的角度精度对结果的影响可以忽略。在测试前对阵列探测器输出结果进行一致性校准, 再对均匀光源进行测试得到归一化结果, 因此探测器之间的非一致性需要考虑, 而探测器的输出辐射照度/亮度值绝对值的准确性对于不确定度分析的影响可以忽略。因此测试系统的不确定度主要包括以下方面: 探测器稳定性 δ_1 , 探测器数据采集器的不确定性 δ_2 , 探测器之间非一致性 δ_3 , 杂光影响 δ_4 。总不确定度为

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} \quad (12)$$

均匀性测试和朗伯特特性测试的不确定度分析结果分别如表 5 和表 6 所示, 其中探测器的稳定性经 24 h 实测为 0.008%, 数据采集器不确定度为 0.005%, 均匀性探测器之间非一致性为 0.29%, 朗伯特特性探测器之间非一致性为 0.18%, 杂光测试结果为 0.1%。

表 5 均匀性测试不确定度分析

Table 5 Uncertainty of uniformity test

| Uncertainty source | Value / % |
|--------------------------------|-----------|
| Stability of detector | 0.008 |
| Uncertainty of data collection | 0.005 |
| Inconsistency | 0.292 |
| Miscellaneous light effect | 0.105 |
| Total uncertainty | 0.310 |

根据(12)式可得均匀性测量不确定度为

$$\delta_s = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \sqrt{0.008^2 + 0.005^2 + 0.292^2 + 0.105^2}/100 = 0.310\%。 \quad (13)$$

表 6 朗伯特特性测试不确定度分析

Table 6 Uncertainty analysis of Lambert characteristic test

| Uncertainty source | Value /% |
|--------------------------------|----------|
| Stability of detector | 0.008 |
| Uncertainty of data collection | 0.005 |
| Inconsistency | 0.187 |
| Miscellaneous light effect | 0.105 |
| Total uncertainty | 0.217 |

根据(12)式可得朗伯特特性测量不确定度为

$$\delta_L = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \sqrt{0.008^2 + 0.005^2 + 0.187^2 + 0.105^2}/100 = 0.217\%。 \quad (14)$$

7 应 用

本研究研制的超大口径均匀光源系统经过测试满足设计要求,目前已投入使用,图 17 为新研制的超大口径均匀光源系统在 2.5 m 口径下为大口径民用卫星定标的现场图片,该系统对我国未来 3 m 量级大口径光学遥感器的辐射定标来说具有广泛的使用价值。同时新研制的辐射性能测试装置也应用于其他大口径设备的辐射性能测试,并具有良好的效果。

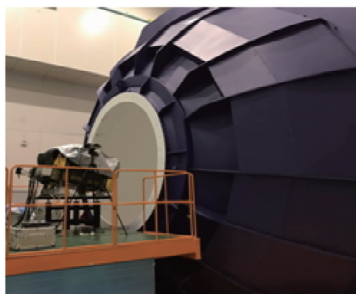


图 17 超大口径均匀光源应用现场

Fig. 17 Application scene of ultra-large aperture uniform light source

8 结 论

研制了一套超大口径均匀光源系统,该系统内直径为 8 m,最大出光口径为 3.2 m,另有 2.5 m 和 0.8 m 口径可选用。结合积分球设计原理和黑体辐射定律设计光谱辐射亮度,利用 LightTools 光线追迹软件结合经验分布对多种分布组合进行仿真分析,筛选最优辐射性能的组合。同时针对超大口径光源辐射性能测试问题,研制一套基于阵列探测器的辐射性能测试设备,并应用校正算法进行一致性校正。实测 0.8 m 口径出口光谱辐射亮度大于 $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$,3.2 m 开口的均匀性优于 98.362%,中心点 $\pm 45^\circ$ 范围内朗伯特特性优于 98.810%。实测结果均满足研制要求。目前超大口径均匀光源已经在我国大口径光学遥感器辐射定标工作中发挥着重要作用,同时新研制的测试设备也已应用于其他均匀光源测试,并取得了良好效果。

参 考 文 献

- [1] Barbara G G. Field guide to radiometry[M]. Washington: SPIE Field Guides Press, 2011: 15-130.
- [2] Wu Xingxing, Liu Jinguo, Zhou Huaide, *et al.* An improved radiometric calibration method of interline transfer CCD camera based on time delay and integration working mode[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(s1): 126-130.
武星星, 刘金国, 周怀得, 等. 一种改进的时延积分模式行间转移 CCD 相机辐射定标方法[J]. 中国激光, 2010, 37(s1): 126-130.
- [3] Wang Jiaqi, Han Changyuan. The current status of space optical remote sensor research in CIOMP[J]. Chinese J

- Lasers, 2003, 30(s1): 173-182.
- 王家骥, 韩昌元. 自力更生、自主创新创建我国航天光学遥感器研制基地[J]. 中国激光, 2003, 30(s1): 173-182.
- [4] Chen Zhe, Zhang Xingxiang, Chen Changzheng, *et al.* Distortion mapping correction in testing of large off-axis aspherical mirrors with null lens[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1008001.
- 陈 哲, 张星祥, 陈长征, 等. 大口径离轴非球面补偿检测的畸变校正[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1008001.
- [5] Liu Li, Chen Xindong, Xiong Ling, *et al.* Angle error Investigation in laser tracker testing large aspheric mirrors[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1104003.
- 刘 力, 陈新东, 熊 玲, 等. 大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1104003.
- [6] Hu Haifei, Luo Xiao, Qi Erhui, *et al.* System integration and control of the hydrostatic supports for manufacturing ultra-large optics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822001.
- 胡海飞, 罗 霄, 戚二辉, 等. 超大口径光学制造的静压支撑系统集成与控制[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822001.
- [7] Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, *et al.* Fast radiance calibration for ground-based large-aperture infrared optoelectric equipment[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0301003.
- 刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 地基大口径红外光电设备快速辐射定标[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0301003.
- [8] Hu Jun, Wang Dong, Sun Tianyu. Application and development of recent space optical imaging remote sensors[J]. Chinese Optics, 2010, 3(6): 519-533.
- 胡 君, 王 栋, 孙天宇. 现代航天光学成像遥感器的应用与发展[J]. 中国光学, 2010, 3(6): 519-533.
- [9] Xie Ping, Wu Haoyu, Zheng Xiaobing, *et al.* Automatic directional radiometric testing system for large aperture integrating spheres[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 1943-1950.
- 谢 萍, 吴浩宇, 郑小兵, 等. 大口径积分球方向辐射特性自动测试系统[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 1943-1950.
- [10] Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *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] 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.
- [12] 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): 0712004.
- 袁银麟, 徐 骏, 翟文超, 等. 大口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.
- [13] Sun Jingxu, Liu Hongxing, Xu Yanjun, *et al.* 4 m extended uniform source for radiometric calibration[J]. Chinese Optics, 2015, 8(5): 823-831.
- 孙景旭, 刘洪兴, 许艳军, 等. 4 m 直径均匀扩展定标光源[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 823-831.
- [14] Wu H P, He Y W, Zheng C D, *et al.* Design and characterization of a large aperture spectral radiance source integrating sphere for calibration of satellite remote sensors[C]. SPIE, 2014, 9282: 928226.
- [15] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712006.
- 孙志远, 常松涛, 朱 玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0712006.
- [16] Liu Hongyuan, Wang Hengfei, Ying Chengping, *et al.* A new method for monochromatic uniform planar source[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s222002.
- 刘红元, 王恒飞, 应承平, 等. 一种新型单色面阵均匀光源定标方法[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s222002.
- [17] Wang Hengfei, Wu Bin, Liu Hongyuan, *et al.* Radiation uniformity calibration method of integrating sphere with large aperture[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s212005.
- 王恒飞, 吴 斌, 刘红元, 等. 一种新型大口径积分球辐射均匀性定标方法[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s212005.
- [18] Cariou N, Durell C, Mckee G, *et al.* Effects of Lambertian sources design on uniformity and measurements[J]. SPIE, 2014, 9241: 924116.
- [19] He Y W, Li P, Wu H P, *et al.* Analysis of the output irradiance uniformity of integrating sphere source[C]. SPIE, 2012, 8417: 841729.
- [20] He Y W, Li P, Guo J F, *et al.* Design and characterization of a large-area integrating sphere uniform radiation source for calibration of satellite remote sensors[C]. SPIE, 2010, 7656: 76562E.
- [21] 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[C]. SPIE, 2007, 6677: 667706.
- [22] Hanssen L, Prokhorov A. Numerical modeling of an integrating sphere radiation source[C]. SPIE, 2002, 4775: 106-118.