

doi:10.3788/gzxb20154404.0422003

# 大口径积分球参考光源的均匀性研究

袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 张黎明

(中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

**摘 要:**针对大口径宽视场光学遥感器的相对辐射校正要求, 研究大口径积分球参考光源输出的均匀性. 利用空腔辐射传输理论, 从发光单元辐出度分布及安装位置角度分析了积分球参考光源的均匀性, 分别在积分球出光口中心法线 $\pm 30^\circ \sim \pm 36.8^\circ$ 、 $\pm 30^\circ \sim \pm 45^\circ$ 位置安装点光源(卤钨灯)、近郎伯型面光源(LEDs)并进行优化设计. 研制了直径为 3 m, 开口直径为 1 m 的基于 LEDs 和卤钨灯的积分球参考光源, 并检测了参考光源的均匀性. 检测结果表明, 积分球出光口  $\Phi 890$  mm 内的面均匀性、 $\pm 60^\circ$  以内的角度均匀性均优于 99%, 与分析结果一致.

**关键词:**积分球; 辐射校正; 遥感器; 辐出度; 均匀性

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)04-0422003-7

## Uniformity Research of Integrating Spheres Reference Light Source with Large Exit Aperture

YUAN Yin-lin, ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu, ZHANG Li-ming

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 23003, China)

**Abstract:** To meet the relative radiometric correction requirements of optical remote sensor with large aperture and wide viewing field, the uniformity of integrating spheres light source was studied. Base on sphere cavity radiant theory, the output uniformity of integrating spheres reference light source was analyzed from radiant emittance distribution and mounting position of emitting module. The point source (tungsten-halogen lamps) and Lambert radiant type of surface light source(LEDs) are respectively mounted on the position within  $\pm 30^\circ \sim \pm 36.8^\circ$  and  $\pm 30^\circ \sim \pm 45^\circ$  to the exit normal of integrating spheres through optimal design. Using uniformity analysis result, integrating sphere with diameter of 3 m and diameter exit port of 1 m was designed based on LEDs and tungsten-halogen lamps emitting modules, and the angular and planar uniformity were measured. The results show that the planner uniformity within  $\Phi 890$  mm and the angular uniformity within  $\pm 60^\circ$  are better than 99% to the exit normal.

**Key words:** Integrating spheres; Radiometric calibration; Remote sensor; Radiant emittance; Uniformity

**OCIS Codes:** 220.4830; 120.3150; 280.1310; 300.6170; 330.6180

## 0 引言

大口径宽视场光学成像遥感器的探测元件采用阵列探测器或多片阵列探测器拼接而成<sup>[1]</sup>. 由于阵列探测器像元间辐射响应差异和光学系统的非理想性, 影

响了光学成像遥感器的成像质量, 进而影响测量的准确性, 因此在有效应用前必须对大口径宽视场光学成像遥感器进行实验室相对辐射校正<sup>[1-3]</sup>.

通常采用积分球参考光源进行光学成像遥感器的实验室相对辐射校正<sup>[4]</sup>. 通过观测已知辐射亮度积分

**基金项目:**国家高技术研究发展计划下课题(Nos. 2008A121203, 2012AA1212A302-2)资助

**第一作者:**袁银麟(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为先进辐射定标光源技术. Email: ylyuan@aiofm.ac.cn

**通讯作者:**郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学精确测量的先进方法与仪器、卫星传感器的高精度定标. Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

**收稿日期:**2014-07-31; **录用日期:**2014-09-22

<http://www.photon.ac.cn>

球参考光源,校正光学成像传感器所有像元辐射响应的相对差异<sup>[5]</sup>.在相对辐射校正过程中,各像元辐射响应与积分球出光口平面各位置、各角度的光谱辐亮度一一对应.因此积分球参考光源输出的面均匀性和角度均匀性将直接影响光学成像传感器相对辐射校正准确度.光学传感器的相对辐射校正,一般要求积分球参考光源的出光口充满光学成像传感器的视场,并且面均匀性和角度均匀性均优于98%<sup>[6]</sup>.

在积分球内壁涂层反射率一定的情况下,通常采用严格限制开口比来保证其输出均匀性<sup>[7]</sup>.开口比是所有开孔面积与内壁总面积的比值.按照目前典型的积分球研制水平,开口比小于5%和0.26%时,分别可以实现 $\pm 20^\circ$ <sup>[8]</sup>和 $\pm 60^\circ$ <sup>[9]</sup>出射角度范围内的均匀性优于98%.近年来国际高空间分辨的光学传感器如QuickBird、Geoeye-1、Worldview-2等,光学通光孔径达到了500~1000mm<sup>[10-12]</sup>,全视场角达到了 $\pm 45^\circ$ .我国近年来也在发展大孔径宽视场的光学传感器<sup>[13]</sup>,因此研发大孔径的积分球参考光源并保证其大角度范围内的均匀性,对于这类传感器的相对辐射校正研究具有重要意义.

影响积分球参考光源输出均匀性的因素主要有涂层反射率、涂层郎伯性、开口比和发光单元的辐出度分布、发光单元在积分球上的分布位置.其中涂层反射率和郎伯性由涂层材料自身特性决定,适于制作涂层的材料种类较少(通常有硫酸钡和聚四氟乙烯等),能够调整的余地很小.积分球开口面积通常由光学传感器的视场确定.积分球的内部直径受制造工艺和设计成本限制,开口比通常约束在一定范围变化<sup>[7-9]</sup>,对积分球参考光源输出均匀性的改善有限.因此优化发光单元的辐出度分布和发光单元的安装分布位置,是提升积分球参考光源均匀性的重要手段.

目前积分球辐射特性的研究,多集中于出射辐亮度的量值及其准确度分析,对于提高出射均匀性特别是角度均匀性的研究尚不充分<sup>[14-15]</sup>.文献<sup>[14]</sup>通过光学设计软件和Monte Carlo法,对积分球出光口面或内壁涂层各区域进行大量光子的追迹,实现积分球的均匀模拟.面均匀性模拟结果和实测结果的相对偏差在1%以内,角度均匀性实测曲线趋势与仿真结果较为一致.但目前针对发光单元辐出度分布对积分球均匀性影响的研究鲜见报道.

本文利用空腔辐射传输理论,从发光单元辐出度分布及安装位置角度分析了积分球参考光源辐射特性,得到积分球参考光源输出均匀性.利用分析结果,设计了直径为3 m,开口直径为1 m的基于LEDs和卤钨灯的光谱可调积分球参考光源,并检测了积分球的均匀性.

## 1 光源的均匀性分析

积分球参考光源的均匀性是指积分球参考光源出光口平面不同位置、不同角度的光谱辐亮度相对偏差程度,通常使用面均匀性和角度均匀性表示.

本文利用空腔辐射传输理论,分析积分球内壁涂层为理想郎伯型,且内壁涂层反射率和开口比已知的情況下,积分球参考光源输出辐亮度分布与发光单元辐出度分布之间的关系,进而优化发光单元的安装位置.

### 1.1 理想的积分球参考光源对发光单元辐出度分布的要求

理想的积分球参考光源内壁涂层各处光谱辐照度处处均匀,由发光单元的一次辐射和内壁涂层的多次反射叠加形成.图1是发光单元在积分球内一次辐射情况.

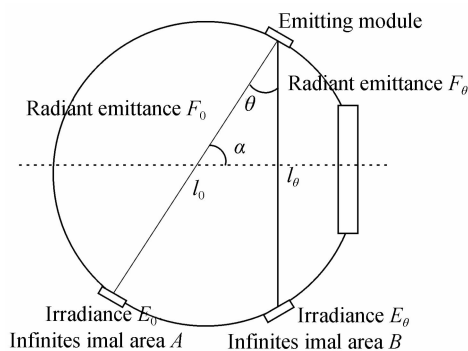


图1 发光单元在积分球内一次辐射情况

Fig. 1 Once-radiation of emitting modules in integrating sphere

图1中,发光单元的发光面与内壁涂层齐平,面元A受到发光单元的垂直照射,与发光单元距离为 $l_0$ ,接收到一次辐照度为 $E_{\lambda_0}$ .面元B接受同一发光单元照射,入射角为 $\theta$ ,与发光单元距离为 $l_\theta$ ,接收一次辐照度为 $E_{\theta}$ .因大部分发光单元辐出度分布具有一定对称性,发光单元辐出度分布以发光单元中心法线为轴对称,设发光单元法线方向单位长度距离处的辐出度为 $F_{\lambda_0}$ ,与法线呈 $\theta$ 角度方向单位长度距离的辐出度为 $F_{\theta}$ .

$$E_{\lambda_0} = F_{\lambda_0} / l_0^2 \quad (1)$$

$$E_{\theta} = F_{\theta} / l_\theta^2 \times \cos \theta \quad (2)$$

$$l_\theta = l_0 \times \cos \theta \quad (3)$$

$$E_{\theta} = F_{\theta} / (l_0^2 \cos \theta) \quad (4)$$

当发光单元的辐出度 $F_{\lambda_0}$ 、 $F_{\theta}$ 满足 $F_{\theta} = F_{\lambda_0} \times \cos \theta$ ,即发光单元的辐出度分布为朗伯型时,积分球内壁涂层面元A和面元B的一次辐照度相等,即 $E_{\lambda_0} = E_{\theta}$ .由于面元B的位置任意性,可知此时积分球内壁一次辐照度处处相等.对于多次反射,可将各面元视为发光单元,若其内壁涂层的反射特性为朗伯型时,多次

反射形成的辐照度也是处处均匀的,由此可以保证积分球参考光源出射均匀性。

当发光单元的辐出度分布以及积分球内壁涂层的反射特性均为朗伯型时,其安装位置仅需避免发光单元一次出射光直接从积分球出光口射出,即安装位置应在积分球前半部,可实现积分球参考光源为均匀性理性的积分。

### 1.2 发光单元辐出度分布对积分球参考光源内壁涂层各处的辐亮度分布影响

由光谱辐亮度传输守恒规律可知,光线从积分球后半部内壁向积分球出光口传输时,如不考虑吸收气体的影响,该光线上各点光谱辐亮度不变.因此通过分析积分球参考光源的后半部内壁涂层各处的光谱辐亮度分布差异来评价其均匀性。

设计了积分球内壁涂层各处的辐亮度分布计算方法,如图2,通过发光单元辐出度分布计算积分球内壁涂层各处的一次反射光谱辐亮度和多次反射光谱辐亮度,进而计算内壁涂层各处的光谱总辐亮度。

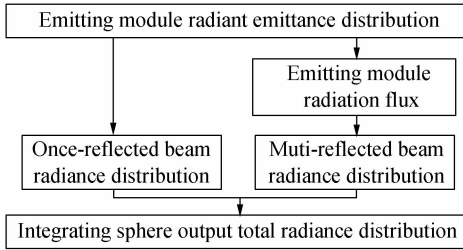


图2 光源内部各处光谱辐亮度计算流程

Fig. 2 Calculating flow chart of reference light source output radiance distribution

结合式(4),推导发光单元照射积分球内壁涂层一次反射辐亮度与辐出度关系,即

$$L_{\lambda}^1 = E_{\lambda} \times \rho_{\lambda} / \pi = F_{\lambda} / (l_0^2 \cos \theta) \times \rho_{\lambda} / \pi \quad (5)$$

式中, $\lambda_{\lambda}$ 为内壁涂层波长 $\lambda$ 处反射率。

多次反射形成的辐照度在积分球内壁涂层处处均匀,对积分球内壁涂层的各处辐亮度贡献一致.积分球内壁涂层的多次反射辐亮度可以由空腔的辐射传输理论推导得到,即<sup>[7]</sup>

$$L_{\lambda}^M = \frac{\Phi_{\lambda}}{\pi A_s} \frac{\rho_{\lambda}}{1 - \rho_{\lambda}(1-f)} = \frac{\Phi_{\lambda}}{\pi A_s} \rho_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{\pi A_s} \times (M_{\lambda} - \rho_{\lambda}) \quad (6)$$

式中, $L_{\lambda}^1$ 为积分球输出波长 $\lambda$ 处光谱辐亮度; $\Phi_{\lambda}$ 为发光单元的波长 $\lambda$ 处发光通量; $A_s$ 为积分球内表总面积; $f$ 为积分球的开口比,即所有开孔面积与内壁总面积的比值; $M_{\lambda}$ 为波长 $\lambda$ 处多次反射比因子,与开口比和反射率有关。

多次反射辐亮度主要和发光通量有关.发光通量可以通过辐出度分布进行计算,计算方法如图3。

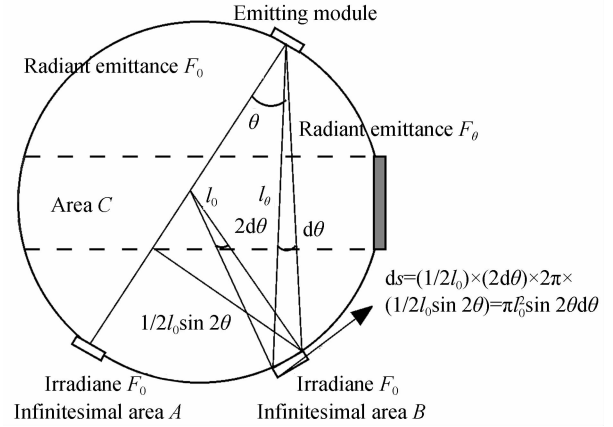


图3 发光单元发光通量计算方法

Fig. 3 Calculating Emitting module radiation flux

发光单元发光通量可表示为

$$\Phi_{\lambda} = \int E_{\lambda} ds = \int_0^{\pi/2} E_{\lambda} \times \pi l_0^2 \sin 2\theta d\theta = 2\pi \int_0^{\pi/2} F_{\lambda} \sin \theta d\theta \quad (7)$$

式中 $\theta$ 为入射方向与垂直照射方向的夹角.多次反射辐亮度可以用辐出度分布表示,即

$$L_{\lambda}^M = \frac{\Phi_{\lambda}}{\pi A_s} \times (M_{\lambda} - \rho_{\lambda}) = \frac{2\pi \times (\pi_{\lambda} - \rho_{\lambda})}{\pi A_s} \int_0^{\pi/2} F_{\lambda} \sin \theta d\theta \quad (8)$$

消掉积分球内表总面积 $A_s$ ,多次反射辐亮度为

$$L_{\lambda}^M = \frac{2(M_{\lambda} - \rho_{\lambda})}{\pi(1-f)} \int_0^{\pi/2} \frac{F_{\lambda}}{l_0^2} \sin \theta d\theta = 2M_{\lambda} \int_0^{\pi/2} \frac{F_{\lambda}}{l_0^2} \sin \theta d\theta \quad (9)$$

为了评价积分球参考光源的面均匀性,沿积分球出光口法线方向,将出光口平面均匀间隔的各测点平面投影到积分球内壁涂层区域(图4中区域C),计算各测点投影区域的光谱辐亮度相对标准偏差 $u_p$ 为

$$u_p = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_c} (L_{\lambda i}^1 - \bar{L}_{\lambda c}^1)^2 / (N_c - 1)}}{\bar{L}_{\lambda c}^1 + L_{\lambda}^M} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_c} [F_{\lambda i} / \cos \theta_i - \sum_{i=1}^{N_c} (F_{\lambda i} / N_c \cos \theta_i)]^2 / (N_c - 1)}}{\sum_{i=1}^{N_c} (F_{\lambda i} / N_c \cos \theta_i) + M_{\lambda} \int_0^{\pi/2} 2F_{\lambda} \sin \theta d\theta} \quad (10)$$

式中, $L_{\lambda i}^1$ 为内壁涂层各测点投影区域一次反射光谱辐亮度; $\bar{L}_{\lambda c}^1$ 为内壁涂层各测点投影区域平均一次反射光谱辐亮度; $F_{\lambda i}$ 为发光单元照明内壁涂层各测点投影区域的辐出度; $N_c$ 为出光口平面内有效测点数目。

角度非均匀性通常选择在水平平面内和垂直平面内出光口平面法线一定角度范围内等角度间隔测量多个测点,如图4。

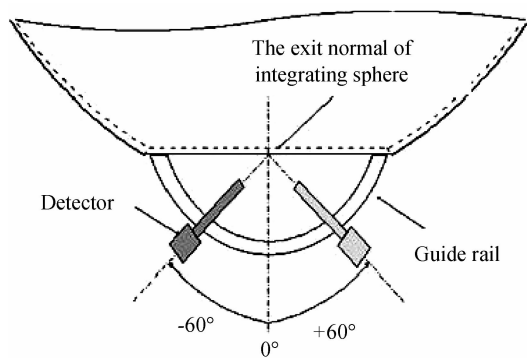


图 4 角度非均匀性检测示意

Fig. 4 Measurement sketch map of angular uniformity

同样计算了出光口平面法线一定角度范围内测点观测区域的光谱辐亮度相对标准偏差  $u_a$ , 评价分球参考光源的角度均匀性, 如式(11).

$$u_a = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_\theta} (L_{\lambda_0}^1 - \overline{L_{\lambda_0}^1})^2 / (N_\theta - 1)}}{\overline{L_{\lambda_0}^1} + L_\lambda^M} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_\theta} [F_{\lambda_0} / \cos \theta_i - \sum_{i=1}^{N_\theta} (F_{\lambda_0} / N_\theta \cos \theta_i)]^2 / (N_\theta - 1)}}{\sum_{i=1}^{N_\theta} (F_{\lambda_0} / N_\theta \cos \theta_i) + M_\lambda \int_0^{\pi/2} 2F_{\lambda_0} \sin \theta d\theta} \quad (11)$$

式中  $N_\theta$  为出光口平面法线一定角度范围内测点总数目. 由式(10)~(11)可知, 积分球参考光源的面均匀性和角度均匀性, 均与发光单元的辐出度和多次反射比因子  $M_\lambda$  有关, 且  $M_\lambda$  越大越有利于提高积分球参考光源的均匀性.

以点光源类型发光单元代替发光区域呈球形的卤钨灯发光单元, 其发光点的高度与内壁涂层齐平时, 辐出度分布为  $F_{\lambda_0} = F_{\lambda_0}$ , 角度均匀性可表示为

$$u_a = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_{\lambda_0}^1 - \overline{L_{\lambda_0}^1})^2 / (N - 1)}}{\overline{L_{\lambda_0}^1} + L_\lambda^M} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [1 / \cos \theta_i - \sum_{i=1}^N (1 / N \cos \theta_i)]^2 / (N - 1)}}{\sum_{i=1}^N (1 / N \cos \theta_i) + 2M_\lambda} \quad (12)$$

由式(12)可知点光源类型发光单元对积分球参考光源均匀性的影响, 均与多次反射比和发光单元入射方向与垂直照射方向的夹角  $\theta$  有关, 因此积分球的多次反射比和点光源类型发光单元安装位置非常重要.

计算涂层材料的反射率(聚四氟乙烯 F4)和积分球的开口比分别为 4% 和 5% 时的多次反射比  $M_\lambda$ , 见图 5(a). 设计 8 个点光源辐出度分布类型的发光单元在积分球空间位置上对称分布, 发光面元的发光点与积分球内壁涂层的高度基本齐平, 偏差不超过 5 mm. 当发光单元安装在靠近积分球出光口法线  $\pm 30^\circ \sim \pm 36.8^\circ$  位置附近(发光单元距离前后半球交接面距离

约为 1 299~1 200 mm)时, 积分球的开口比小于 5%, 即多次反射比大于 15 以上时, 可保证发光单元中心法线  $\pm 60^\circ$  范围内光谱辐亮度相对标准偏差(发光单元位于出光口法线  $\pm 30^\circ$  位置, 相对标准偏差为 0.976%) 小于 1%, 如图 5(b).

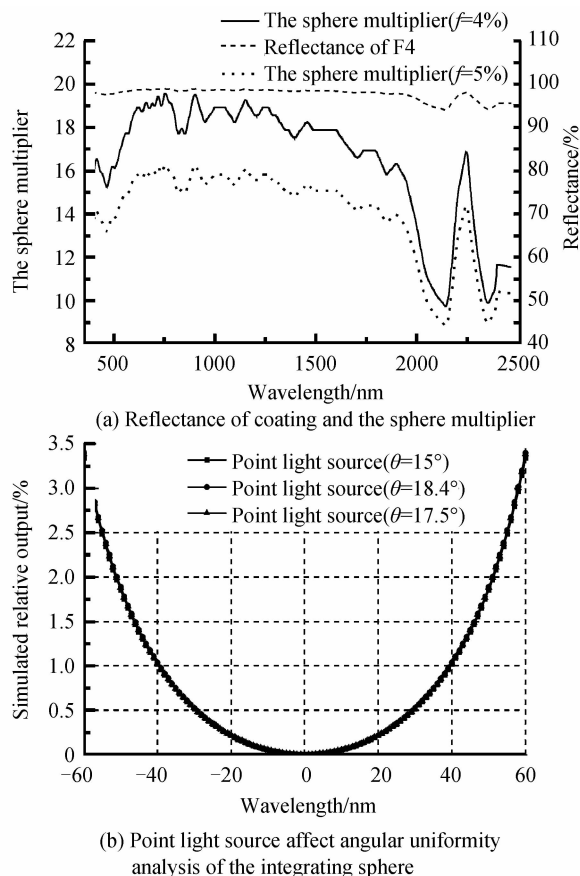


图 5 积分球内部涂层反射率、多次反射比关系图和点光源对积分球输出均匀性的影响

Fig. 5 Relationship between reflectance of coating and the sphere multiplier and point light source affect angular uniformity analysis of the integrating sphere

## 2 光源的光学设计

为满足大口径宽视场光学遥感器的相对辐射校正要求和光谱可调功能, 采用辐出度近朗伯型分布的 LED 发光单元和辐出度分布接近于点光源辐出度分布的卤钨灯发光单元, 设计了内部直径为 3 000 mm, 出光口直径为 1 000 mm 的积分球参考光源.

通过采用多种大功率 LED 发光单元和提高 LED 晶片的集成密度和优化机械安装方案, 积分球共安装 120 个发光单元, 整体核算积分球开口比约为 4%.

为避免发光单元一次出射光直接从积分球出光口法线  $\pm 60^\circ$  范围内射出, 发光单元的安装位置应分布在积分球出光口法线  $\pm 20^\circ \sim \pm 57.4^\circ$  范围内. 通过均匀性分析可知卤钨灯发光单元安装在靠近积分球出光口法

线 $\pm 30^\circ \sim \pm 36.8^\circ$ 位置附近,可保证发光单元中心法线 $\pm 60^\circ$ 范围的均匀性优于99%。考虑到安装空间的限制,设计安装在靠近积分球出光口法线 $\pm 30^\circ$ 位置附近。

LED发光单元的最佳安装位置通过发光单元辐出度分布的精确测量来确定。利用双向反射率分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)测量装置<sup>[15]</sup>,在天顶弧形转动平台上安装光谱辐照度计,在相对于发光单元发光面法线方向 $\pm 60^\circ$ 范围内,对蓝光、红光、暖白色等几种代表性LED发光单元的辐出度分布进行了测量。图6显示了470 nm和520 nm发光单元的辐出度分布情况。

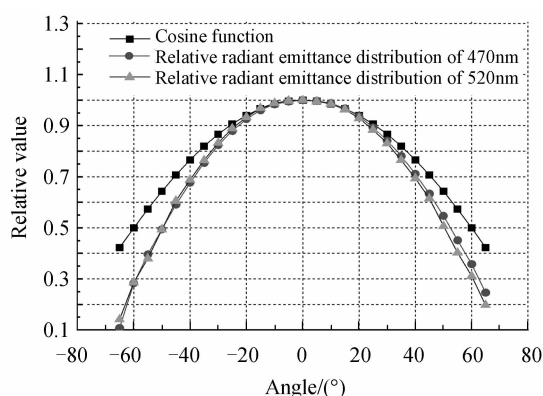


图6 470 nm、520 nm发光单元相对辐出度测量结果  
Fig. 6 Relative radiant emittance measurement results of 470 nm and 520 nm emitting module

根据LED发光单元的辐出度分布测试数据和设定安装位置,LED单元发光单元设计安装在积分球出光口中心法线 $\pm 30^\circ \sim \pm 45^\circ$ 范围内,分析的积分球参考光源的面均匀性和 $\pm 60^\circ$ 范围内角度均匀性优于99%,如图7。LED单元发光单元的安装位置如图8。

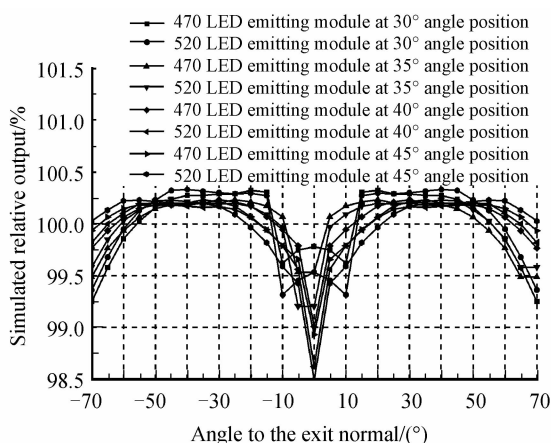


图7 LED对积分球参考光源输出角度均匀性影响分析结果  
Fig. 7 LED affect angular uniformity analysis of the integrating sphere

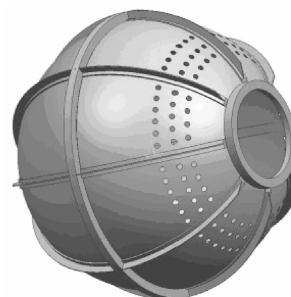
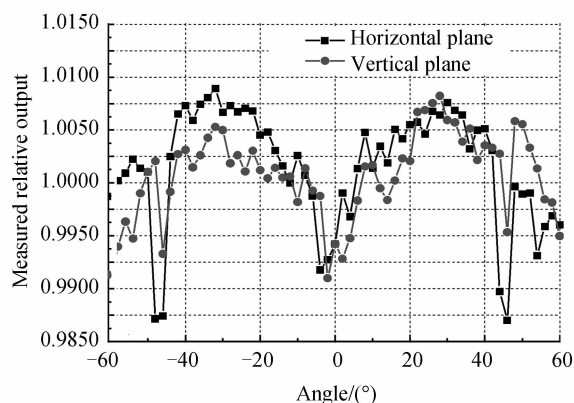


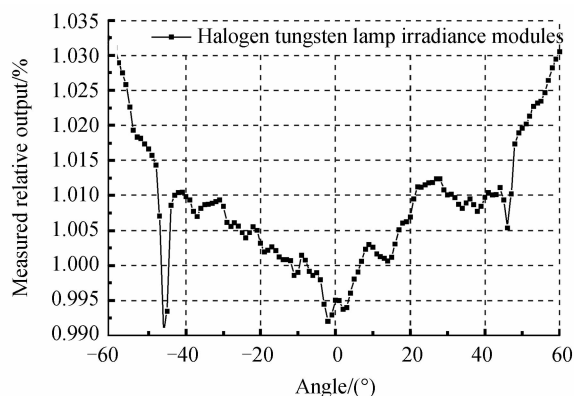
图8 发光单元安装位置  
Fig. 8 Irradiance modules location mounted on the integrating sphere

### 3 光源均匀性测试

采用大口径积分球辐出度分布自动测试系统<sup>[16]</sup>和绝对光谱响应率标准探测器<sup>[17]</sup>对积分球参考光源的均匀性进行测试,测试项目包括积分球平面均匀性和角度均匀性。



(a) Angular uniformity of power-on LED emitting modules



(b) Angular uniformity of power-on tungsten-halogen lamps emitting modules

图9 角度均匀性测量结果( $\pm 45^\circ$ 处的两个低谷,系探测器观测到积分球两半球交界处缝隙)

Fig. 9 Result of angular uniformity (low numerical value detection in the position of  $\pm 45^\circ$  was that detector measured the gap between front hemisphere and back hemisphere)

在出光面法线 $\pm 60^\circ$ 的角度范围内,分别对 LED 发光单元进行了水平平面和垂直平面内的角度均匀性测量,如图 9(a).对卤钨灯发光单元进行了垂直平面内的角度均匀性测量,如图 9(b).

出光口中心法线 $\pm 60^\circ$ 范围角度均匀性( $1 - u_a$ )优于 99%,且与图 5 和图 8 中分析的角度均匀性中心对称分布趋势一致.各角度测量值与分析数值略有差异是因为积分球内壁涂层的反射率分布与理想漫反射体存在差异,同时挡光装置对发光单元的辐出度产生一定影响.

在仅点亮卤钨灯和点亮全部发光单元的情形下进行了面均匀性检测,检测区域  $1100 \times 1100$  mm,完整覆盖积分球出光口,测点间距为 50 mm,共采集 484 个测点数据,如图 10 和表 1.在  $\Phi 1000$  mm 的区域内,面均匀性优于 89.5%,在出光口中心  $\Phi 890$  mm 的区域内,面均匀性优于 99.5%.测试结果表明,利用发光单元辐出度分布计算积分球参考光源角度均匀性的方法

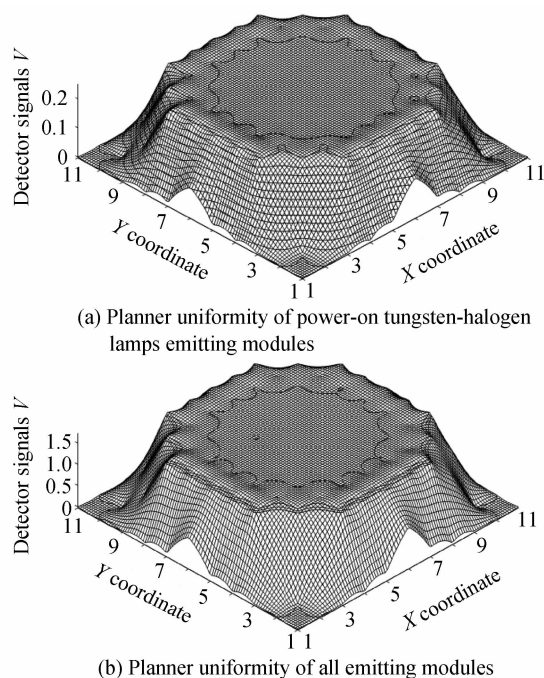


图 10 面均匀性检测结果

Fig. 10 Measurement result of planner uniformity

表 1 光源的面均匀性( $\Phi 890$  mm)

Table 1 Planner uniformity at the exit port region of  $\Phi 890$  mm

Test results	Mean/V	Planner uniformity (1- up)	Max value/V	Min value/V
Power-on tungsten-halogen lamps emitting modules	0.239	99.56%	0.241	0.236
Power-on all emitting modules	1.649	99.59%	1.659	1.627

符合设计要求.

## 4 结论

本文利用空腔的辐射传输理论,从发光单元辐出度分布及安装位置角度分析了积分球参考光源均匀性,并分别分析了郎伯型和点光源两种辐出度分布类型的发光单元对积分球参考光源均匀性的影响.采用点光源辐出度分布的卤钨灯发光单元和实测辐出度分布的 LED 发光单元,设计了直径为 3 m、开口直径为 1 m 的基于 LEDs 和卤钨灯的光谱可调积分球参考光源,模拟并检测积分球参考光源的均匀性.检测结果与分析结果一致,验证了分析方法的正确性.

本文均匀性分析方法认为发光单元辐出度分布和多次反射比是积分球参考光源均匀性最关键的两个因素,并得出使用辐出度分布呈郎伯型的发光单元可有效提高积分球参考光源的均匀性.因此优化发光单元辐出度分布和安装位置为提升积分球参考光源均匀性提供重要手段.

本文设计的积分球均匀性分析方法,有利于开展大孔径积分球参考光源的大角度范围辐射特性的分析,在研制大口径和超大口径积分球参考光源方面具有良好的借鉴价值.

本文未考虑挡光装置和积分球内壁涂层的方向反射率分布对积分球参考光源均匀性的影响.未来将通过 BRDF 装置实测挡光装置和发光单元在一起的辐出度分布,并使用实际内壁涂层的反射率分布函数建立模型,更加精确地得到积分球参考光源的均匀性.

## 参考文献

- [1] WANG Wen-hua. Research on imaging uniformity of remote camera with wide field of view [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010, 1-13.  
王文华. 大视场遥感相机成像均匀性研究[D]. 中国科学院研究生院, 2010, 1-13.
- [2] XIU Ji-hong, HUANG Pu, LI Jun. Non-uniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7): 0711003.  
修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2013, **33**(7): 0711003.
- [3] ZHANG Xin, LIN Jia-ming, ZHANG Zhe, et al. Research on measuring technique for image sensors' uniformity of the CCD image forming system with large field angle [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6): 846-848.  
张鑫, 林家明, 张哲, 等. 大视场 CCD 成像系统像面均匀性测试技术研究[J]. *光学技术*, 2005, **31**(6): 846-848.
- [4] QIAO Yan-Li, ZHENG Xiao-bing, WANG Xian-hua, et al. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(5): 616-623.  
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(5): 616-623.
- [5] ZHENG Xiao-bing. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, **32**(05): 36-43.  
郑小兵. 高准确度卫星光学遥感辐射定标技术[J]. *航天返*

- 回与遥感. 2011, **32**(05): 36-43.
- [6] XU Xiao-feng, WANG Ji, ZHANG Li-ming, *et al.* Study on uniformity measurements of space integrating sphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, **22**(5): 817-820.  
徐晓峰, 王冀, 张黎明, 等. 航天积分球面均匀性检测的研究[J]. 量子电子学报, 2005, **22**(5): 817-820.
- [7] Labsphere Inc. A guide to integrating sphere theory and applications [EB/OL]. 2012-12-06. [2015-03-24]. <http://www.labsphere.com/technical/technical-guides.aspx>.
- [8] YE Zhao, REN Jian-wei, LI Bao-yong, *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参考光源辐射性能研究[J]. 宇航计测技术, 2012, **32**(3): 39-44.
- [9] Optronic Laboratories, LLC. 2008-08, OL 468-39 Wide FOV automated integrating sphere calibration standard [EB/OL]. [2015-03-24]. [http://www.olinet.com/content/library/1223404524B139\\_468-39\\_8-08.pdf](http://www.olinet.com/content/library/1223404524B139_468-39_8-08.pdf).
- [10] Center for remote imaging, Sensing & Processing. 2001-10-18. Quickbird 2 was successfully launched on 18 Oct 2001 [EB/OL]. 2014-07-31. [2015-03-24]. [www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/quickbird.htm](http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/quickbird.htm).
- [11] Geoeye-2 Satellite Image and Satellite System Specifications [EB/OL]. 2014-07-31 [2015-03-24]. <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/geoeye-2>.
- [12] Asian suiveying and mapping. 2009-10-08, WorldView-2 Satellite Sensor [OB/OL]. 2009-0-08. [2015-03-24]. <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-2/>.
- [13] MING Ming, YANG Fei, ZHAO Jin-yu, *et al.* Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(1): 149-154.  
明名, 杨飞, 赵金宇, 等. 折反式大口径、大视场、宽光谱光学系统[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(1): 149-154.
- [14] 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.
- [15] LIU Hong-xing, REN Jian-wei, WANG Zhi, *et al.* Radiometric characteristics simulation of large aperture integrating sphere based on LightTools [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(4): 960-965.  
刘洪兴, 任建伟, 万志, 等. 基于 LightTools 的大口径积分球辐射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(4): 960-965.
- [16] 金伟其, 胡威捷. 辐射度, 光度与色度及其测量 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006, 1-46.
- [17] XIE Ping, WU Hao-yu, ZHENG Xiao-bing, *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. 大口径积分球辐出度分布自动测试系统[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(9): 1943-1950.
- [18] LI Xin, ZHENG Xiao-bing, XUN Li-na, *et al.* Realization of field BRDF acquisition by multi-angular measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 66-70.  
李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量[J]. 光电工程, 2008, **35**(1): 66-70.
- [19] ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu, ZHANG Jun-ping, *et al.* Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 749-752.  
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器[J]. 光学学报, 2002, **21**(6): 749-752.