

# 一种高亮度积分球定标光源的热设计

孙景旭<sup>1,2</sup> 张汉壮<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

<sup>3</sup>吉林大学物理学院, 吉林 长春 130000

**摘要** 针对目前光学口径不断增大的空间光学遥感器对实验室辐射定标的要求,设计了一种使用近距离小面源照明方式定标的高亮度积分球光源,并对该光源的光学参数和结构参数进行了详细设计。为了解决高亮度积分球使用时的散热问题,采用水冷的散热方式,设计了专门的散热管路。对该光源循环水流速0.1 m/s下利用有限元分析法热仿真分析,仿真结果表明,溴钨灯光源附近温度维持在125 °C左右,积分球出光口温度维持在80 °C左右。实验结果表明,溴钨灯光源附近温度维持在125 °C左右,积分球出光口温度维持在100 °C左右。通过对比分析了积分球出光口温度差异的原因,验证了仿真分析与理论计算的正确性。同时测试了该光源在400~900 nm波段范围内光谱辐亮度为6714 W/(m<sup>2</sup>·sr)。

**关键词** 遥感;高亮度;水冷;光谱辐亮度

中图分类号 TP 702

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0312002

## Thermal Design for a Kind of High-Light-Level Integrating Sphere Calibration Source

Sun Jingxu<sup>1,2</sup> Zhang Hanzhuang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

<sup>3</sup>*College of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130000, China*

**Abstract** In order to meet laboratory radiometric calibration requirements for increasing optical aperture of optical remote sensors, a kind of high-light-level integrating sphere calibration source is designed based on near small source method. Meanwhile the optical and structural parameters of the high-light-level integrating sphere calibration source are designed in detail. To solve the problem of heat dissipation of high-light-level integrating sphere calibration source, circulating cooling water is used as cooling means, and special cooling pipes are designed. The high-light-level integrating sphere calibration source is analyzed by finite element analysis method of thermal simulation in the state of 0.1 m/s of the circulating water. From the analysis results, the temperature around the tungsten bromine lamp is about 125 °C, the outlet temperature of the high-light-level integrating sphere calibration source is about 80 °C. From the experimental results, the temperature around the tungsten bromine lamp is about 125 °C, the outlet temperature of the high-light-level integrating sphere calibration source is about 100 °C. Through the comparative outlet temperature difference of the high-light-level integrating sphere calibration source, the causes are explained, and the validate of simulation

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2014-09-22

基金项目: 国家863计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 孙景旭(1984—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事空间光学遥感器辐射定标方面的研究。

E-mail: sunjingxu2004@163.com

导师简介: 张汉壮(1962—),男,博士,教授,主要从事物理学科领域内原子相干效应、光子晶体、燃烧诊断、纳米复合材料超快动力学过程和辐射定标等方面的研究。E-mail: zhanghz@jlu.edu.cn

analysis and theoretical calculations are verified. Meanwhile it can be suggested in the measurement data that the integrated spectral radiance of the high-light-level integrating sphere calibration source is  $6714 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$  in the range of 400 nm to 900 nm.

**Key words** remote sensing; high light level; cooling water; spectral radiance

**OCIS codes** 120.3150; 230.1980; 290.4210

## 1 引 言

大口径积分球是空间光学遥感器实验室辐射定标的主要设备,用于空间光学相机从研发到出厂发射前的辐射标定,从而建立相机初始的光谱辐射亮度输入与相机图像灰度值输出之间的量化关系。为了通过实验室定标结果对遥感图像进行相对辐射校正,大口径均匀扩展光源应充满光学系统的视场和孔径均匀地照明遥感器焦面探测器,并满足从光学系统入瞳的辐射输入到最终的电子学信号输出的端对端辐亮度定标条件<sup>[1-5]</sup>。

随着空间光学有效载荷口径的不断增大,常规积分球定标光源的直径和开口尺寸需要随之加大才能满足积分球光源与被定标光学有效载荷之间充满孔径、充满视场和端对端的需求,从而实现全光路、全口径和全视场的定标要求<sup>[6]</sup>。然而这会带来很多设计、施工和使用维护上的困难,包括:配套基建、结构稳定性、散热问题、电源供应、光源安装和内表面涂层的喷涂以及设备维护等等,其工程造价和使用维护成本十分巨大,不仅增加了科研成本还必须承受研制和使用过程中的风险。建造大直径、大出光口的常规积分球进行空间光学有效载荷的实验室辐射定标已无法满足未来需求,因此人们选用近距离小面源照明的方法(琼斯法)<sup>[7]</sup>来实现大口径光学有效载荷的实验室辐射定标。本文论述的高亮度积分球光源采用小开口比积分球内置大功率溴钨灯来实现,在用于某航天遥感器实验室辐射定标实验时,操作灵活,使用方便,能够满足辐射定标的使用需要。

在具体辐射定标实施过程中,根据定标光源的尺寸及其与被定标仪器设备之间的相对位置关系可以采取不同的定标配置或照明方案,常见的有以下5种照明方案:远距离点源照明、远距离扩展源照明、近距离小面源照明、近距离扩展源照明以及直接方法。远距离点源照明优点是几乎任意定标光源都可以用这种照明方案,只要定标源和系统的距离足够远以满足距离平方反比定律的要求,缺点是距离 $S$ 必须为已知量且仪器输出信号幅度通常比较小,另外测量结果会受大气和背景的影响。远距离扩展源照明优点是定标源和被定标系统之间的距离变得不重要,并且由于定标源充满了系统视场而使得测量不受背景的影响,缺点是测量结果仍会受大气干扰,另外还需要大面积的均匀定标光源。近距离扩展源照明优点是定标结果除了对距离不敏感之外受背景和大气的影响也较小,这种定标照明方案同样需要相当大的均匀面光源。直接方法优点是定标配置简单、定标成本低,缺点是可见光范围的定标会受背景辐射的干扰,且没有计及由于未充满孔径和视场而引起的响应非均匀性对定标结果的影响。近距离小面源照明优点是受大气影响小并且对定标光源的面积要求不高,可以弥补近距离扩展源照明对定标光源尺寸的要求。

传统的积分球光源多采用风冷或水冷进行散热,但是风冷的散热方式需要在结构上设计大功率的散热风扇,风扇引起的周围的空气扰动会在一定程度上影响定标精度。本文中高亮度积分球光源采用水冷方式散热,因此如何将溴钨灯及积分球内部多余的热量尽可能快速导入到周围环境中成为高亮度积分球光源研制成败的关键。

## 2 高亮度积分球光源设计

为了满足某空间电荷耦合器件(CCD)相机的定标要求,确定使用扩展源定标时积分球最大输出辐射亮度大于  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$  (400~900 nm)<sup>[8]</sup>。

近距离小面源和扩展光源在探测器接收均匀且同样大小辐照度的意义上是等效的<sup>[9]</sup>。由此初步确定高亮度积分球光源内置溴钨灯光源功率为 1000 W。

对水冷散热系统进行结构设计,初步确定积分球球体内径为 200 mm,开口 25 mm,4 个光源口均布在与积分球开口面距离 15 mm 的圆周上。8 条管径为 6.5 mm 的水冷循环管路分布在圆周上。为了避免积分

球开口壁厚掠入射对开口均匀性的影响,将开口倒斜角。鉴于硫酸钡使用温度在 100 ℃ 以下,内部涂层选用耐高温且化学稳定性好的聚四氟乙烯压制成型附着在球体内壁上。

### 3 高亮度积分球光源热设计

高亮度积分球光源通过小开口比积分球内置大功率溴钨灯光源来实现,内置溴钨灯光源及积分球内置涂层成为影响高亮度积分球光源出光口亮度的关键。积分球内置溴钨灯光源将电功率转化为光功率和热功率,传热方式主要是传导和辐射,绝大部分热量辐射至积分球球体内部,同时小开口比也不利于球体内部积累的热量通过辐射和对流方式传导至周围空气中,如此高的热能直接辐射积分球内置涂层,势必会造成内置涂层反射率的下降,最终影响到积分球的出射辐射度。为此需要采取有效的热控措施,提高散热效率、改善散热条件<sup>[10]</sup>,以降低溴钨灯光源附近尤其是涂层表面的温度。这样需要合理的水冷循环设计来保证积分球内部多余辐射热量及溴钨灯光源附近积聚的热量更快更多地导入至冷端,从而确保高亮度积分球光源的发光稳定性,最终来保证实验室辐射定标精度。

为了更快地将溴钨灯光源附近积聚的热量导出,将热管通过压紧结构连接石英灯座和积分球外壳,同时在积分球壳体上设计水冷循环管路,通过冷循环水将热量导入周围环境中。

#### 3.1 水冷系统放热量计算

内置溴钨灯光源总的电功率消耗主要分为光辐射功率、热阻功率、球壳热传导功率。由于水冷系统中取消散热风扇,水冷系统热量可按能量守恒关系式计算为

$$P_w = P_1 + P_2, \quad (1)$$

式中  $P_w$  为积分球内置光源总功率,  $P_1$  为 400~780 nm 光辐射功率,  $P_2$  为经热辐射、热传导和热对流的功率。由前所述  $P_w$  为 1000 W,  $P_1$  为 100 W,  $P_2$  为 900 W。

#### 3.2 冷却水总流量计算

该光源使用水冷散热所需冷却水的总流量为

$$Q = \frac{P_w}{\rho \cdot c_m \cdot \Delta\theta}, \quad (2)$$

式中  $Q$  为冷却水总流量;  $\rho$  为冷却水的比重,大小为 1000 kg/m<sup>3</sup>;  $c_m$  为水的比热,大小为 4.2 kJ/(kg·℃);  $\Delta\theta$  为冷却水通过积分球后的允许温升,设计中按照 40 ℃ 考虑。代入数据后得到  $Q$  为 6.0×10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>/s。

#### 3.3 环形管路计算

积分球内置环形管路可以通过两层球壳内盘水管或者积分球球壳内加工出环形管路来实现,然而两层球壳内盘水管的形式由于水管与球壳壁接触面积小使得导热效率差,为此内置水冷散热管路采用在积分球球壳内直接加工出环形管路的方式实现。从而通过增加冷却水与积分球球壳的接触面积来提高高亮度积分球光源的散热效果。环形管道均匀分布且规格相同。总环形管路数量  $n$  由以下公式给出:

$$n = \frac{Q_w}{v \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_w}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

式中  $Q_w$  为留取一定裕度后的实际冷却水的流量,此时取为 4 $Q$ ;  $v$  为每个水管中水的流速,取为 0.1 m/s;  $d_w$  为水力直径,圆管取内径,直径取为 6.5 mm。代入数据后得到  $n$  为 7.2,取  $n$  为 8。

#### 3.4 温差计算

根据努谢尔准则:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}, \quad (4)$$

式中  $Nu$  为努谢尔特数,  $Re$  为雷诺数,  $Re < 2100$  时流动处于层流状态,  $Re \geq 4000$  时流动处于紊流状态,取为 2000;  $Pr$  为普朗特数,取为 7.02。

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_w}, \quad (5)$$

$$q = \frac{P_w}{S_w}, \tag{6}$$

$$\Delta\theta_w = \frac{q}{h}, \tag{7}$$

式中  $h$  为放热系数;  $\lambda$  为冷却水的导热系数, 取为  $0.599 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{k})$ ;  $S_w$  为积分球球体散热总面积;  $q$  为积分球比热流;  $\Delta\theta_w$  为积分球球体与冷却水的温差, 代入数据后得到  $\Delta\theta_w$  为  $3.94 \text{ }^\circ\text{C}$ 。上述各个过程实现后, 积分球球体与冷却水之间的温差最小。

### 3.5 热仿真分析

在进行热设计和热分析时, 利用热仿真技术, 能够对高亮度积分球光源的水冷系统进行一定程度的预测, 确定和消除高亮度积分球光源的热问题, 减少设计成本, 提高高亮度积分球光源的一次成功率, 改善高亮度积分球光源的性能和可靠性, 缩短研制周期。热分析软件能够比较真实地模拟系统的热工况, 预测各部件器件之间的工作温度值, 纠正不合理的布局, 对各部件进行有效的热控制, 保证高亮度积分球光源在各种复杂环境中工作的稳定性和可靠性。采用前面所述的热设计方案后, 将热传导路径中各管道以及热传导辐射等转化成相应的边界条件和约束, 加载到热分析模型中, 利用热分析软件进行计算机仿真分析计算。根据所得结果修改热控制和热设计方案, 之后再对热模型进行计算机辅助工程(CAE)分析, 修正热模型, 经过若干次的改进设计, 可以对各部件进行有效的热分析<sup>[11]</sup>。保证高亮度积分球光源工作在规定的温度极限内。

利用TMG软件建立科学合理的有限元热模型进行热分析, 有限元模型中共建立了12个热耦合, 划分了1216个单元, 885个节点。高亮度积分球光源的热分析模型如图1所示。

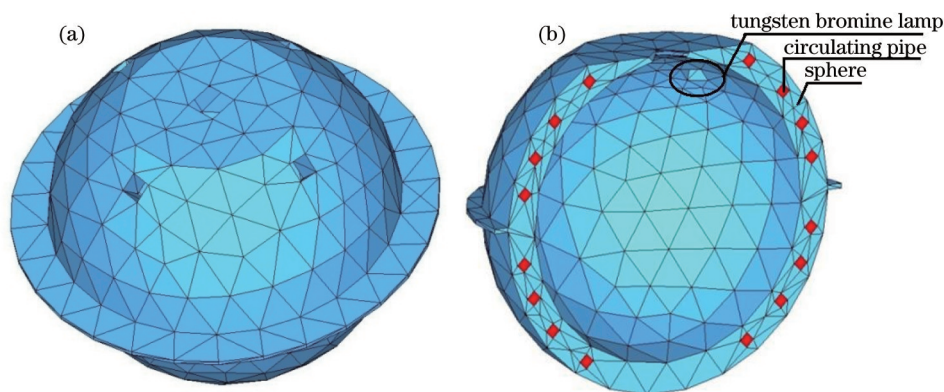


图1 有限元热分析模型

Fig. 1 Model for finite element thermal analysis

对该定标光源施加合理的边界条件, 根据上述对定标光源的设计计算, 4个光源口内置4只250 W 溴钨灯光源, 8条管径为6.5 mm的水冷循环管路分布在圆周上。循环水初始温度设定为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。同时按照各部件的实际情况定义材料属性, 主要分析计算变量的材料属性见表1所示。

利用UG软件中Thermal/Flow模块对定标光源模型有限元分析, 经稳态计算得到高亮度积分球光源的各节点温度。4只250W 溴钨灯光源全开状态下的高亮度积分球光源温度分布稳态云图如下图所示。其中图2是循环水流速为  $0.1 \text{ m/s}$  状态下, 图3为循环水流速为  $0.2 \text{ m/s}$  状态下。

表1 有限元分析主要计算变量

Table 1 Main calculation parameters for finite element analysis

Materials	Density $\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^3)$	Specific heat capacity $c / (\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Thermal transmissivity $\lambda / (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Aluminum	2.70	896	167
PTFE	2.2	1000	0.27
Heat pipe	3.34	141.5	141000
Quartz	2.3	255	138



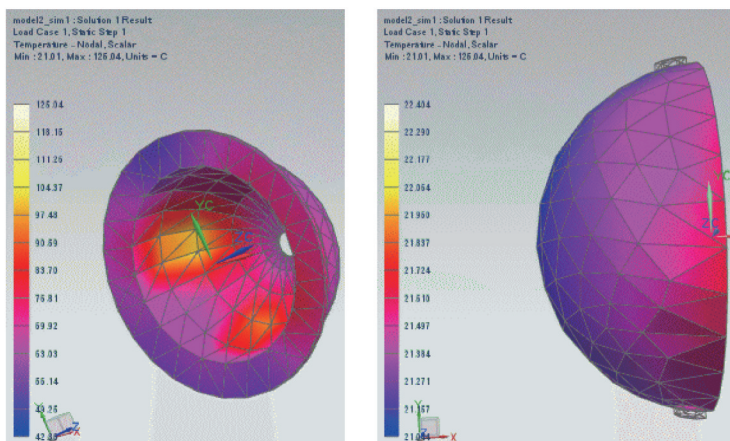


图 2 循环水流速为 0.1m/s 下高亮度定标光源温度分布稳态云图

Fig. 2 Nephogram of high luminance calibration source temperature distribution under 0.1 m/s of the circulating water velocity

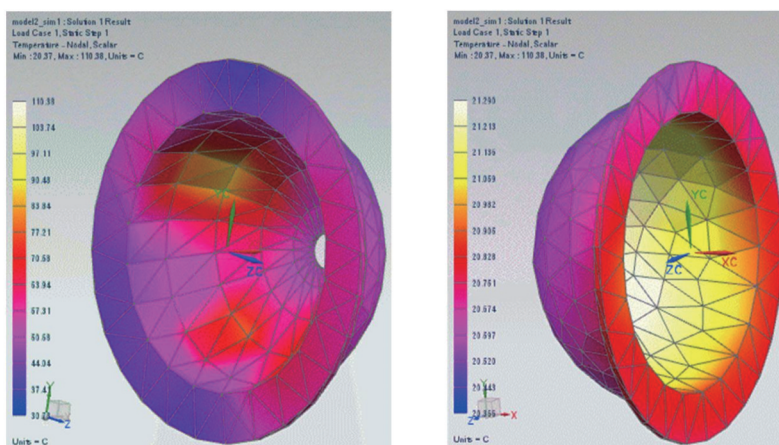


图 3 循环水流速为 0.2 m/s 下高亮度定标光源温度分布稳态云图

Fig. 3 Nephogram of high luminance calibration source temperature distribution under 0.2 m/s of the circulating water velocity

从分析温度云图中可以看出,冷却循环水流速 0.1 m/s 时溴钨灯附近温度在 125 °C 左右,积分球出光口温度在 80 °C 左右。冷却循环水 0.2 m/s 时溴钨灯附近温度在 110 °C 左右,积分球出光口温度在 65 °C 左右。随着冷却循环水流速的增加,能够大幅度提高散热效率。

## 4 实验验证

### 4.1 热测试

为了验证计算及仿真结果的可靠性,将 4 个 250 W 溴钨灯光源点亮同时开启循环水,设定冷却循环水的流

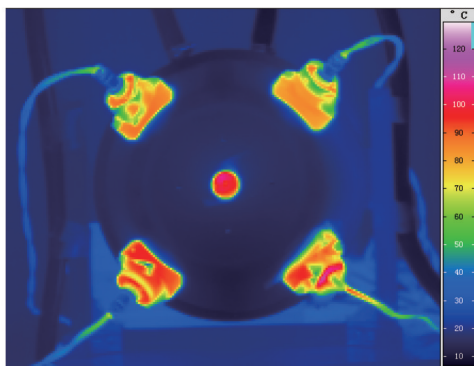


图 4 循环水流速 0.1 m/s 下高亮度定标光源温度场

Fig.4 Temperature distribution of high luminance calibration source under 0.1 m/s of the circulating water velocity

速为 0.1 m/s。保证高亮度积分球光源工作不低于 10 min 条件下,利用红外热像仪(型号 VC270,德国)采集稳定工作状态下高亮度积分球光源的热图像,如图 4 所示。由图像可以看出,使用水冷的散热方式能使溴钨灯光源附近温度维持在 125 ℃左右,积分球出光口温度维持在 100 ℃左右。从而验证了仿真结果的可靠性。

#### 4.2 光谱辐亮度测试

采用实验室已标校的光谱辐射计 PR 735 对高亮度积分球光源进行光谱辐亮度测试,测试数据如图 5 所示,将图中数据在 400~900 nm 积分得到高亮度积分球光源在 400~900 nm 的光谱辐亮度为 6714 W/(m<sup>2</sup>·sr)。

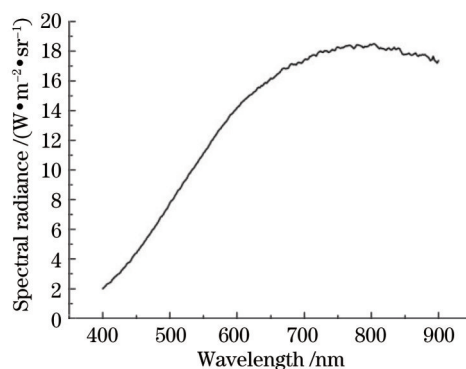


图5 光谱辐射亮度测试结果

Fig.5 Test results of spectral radiance

#### 4.3 光谱辐亮度稳定性测试

打开积分球的 4 只固定光源,设定采样间隔 1 min,待系统稳定,开始测量。连续测量 2.5h,测试结果如图 6 所示,最大偏差(测量值与测量平均值的偏差)小于 0.05%,均方差在 0.02%左右。

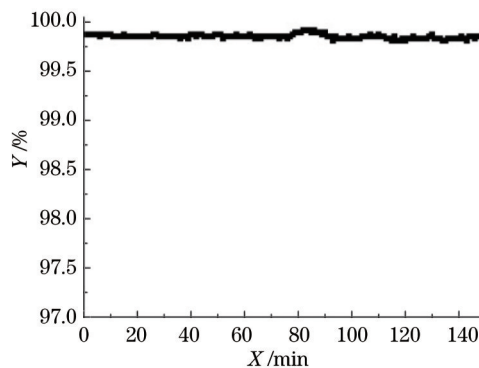


图6 定标光源出光口稳定性测试曲线

Fig.6 Output stability testing curve of the calibration source

## 5 结 论

通过仿真设计,采用水冷的散热方式,完成了高亮度积分球定标光源的热设计,解决了大口径空间光学遥感器辐射定标用高亮度积分球光源的导热问题。利用有限元对高亮度积分球光源热仿真分析,分析结果显示,溴钨灯光源附近温度维持在 125 ℃左右,积分球出光口温度维持在 80 ℃左右。实验结果表明,在 400~900 nm 波段范围内光谱辐亮度为 6714 W/(m<sup>2</sup>·sr)。使用水冷的散热方式后溴钨灯光源附近温度维持在 125 ℃左右,积分球出光口温度维持在 100 ℃左右。对比来看,溴钨灯光源附近温度与仿真结果接近,从而验证了仿真分析中对耦合单元以及边界条件加载的正确性与合理性,但是积分球出光口温度仿真结果差别较大,分析原因为热管与灯座和积分球壳体接触不紧密,导致灯座的一部分热量并没有直接通过水冷散热而直接传导至积分球球体内部造成的。

虽然水冷的散热方式可以在大大降低声噪的同时提高散热效率,但是采用水冷散热方式得到的高亮度积分球定标光源由于需要设计循环水道,相对于风冷的散热方式结构比较复杂;水循环对部件的防腐要求

较高,需要使用铝合金或者不锈钢的材质加工积分球球体,这样对加工工艺手段和系统的密封性提出了更高的要求;同时积分球内置涂层反射率成倍影响积分球出光口处的辐射亮度,对高反射率涂层的耐高温性提出了较高的要求。今后随着科学技术的进步和工艺水平的不断改进,各种新导热材料、新导热方式以及新导热技术的研究和应用,将使这方面的研究工作获得更好的成果。

## 参 考 文 献

- 1 Wan Zhi, Li Baoyong, Li Xiansheng, *et al.*. Influence of integrating sphere source's absolute radiometric calibration and correcting methods [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(8): 863-868.  
万 志, 李葆勇, 李宪圣, 等. 积分球光源分布温度对宽波段光学遥感器绝对辐射定标的影响及其校正[J]. 发光学报, 2012, 33(8): 863-868.
- 2 Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. Development of BRDF absolute measuring device [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.  
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
- 3 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.
- 4 Li Yudong, Wang Bo, Guo Qi, *et al.*. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2778-2784.  
李豫东, 汪 波, 郭 旗, 等. CCD与CMOS图像传感器辐射效应测试系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2778-2784.
- 5 Liu Hongxing, Sun Jingxu, Liu Zexun, *et al.*. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1447-1454.  
刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1447-1454.
- 6 Yang Benyong, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. System design of the integrating sphere used for on-board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3545-3550.  
杨本永, 张黎明, 陈洪耀, 等. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3545-3550.
- 7 James M Palmer, Barbara G Grant. The Art of Radiometry[M]. Washington: SPIE Press, 2010, 361.
- 8 Li Baoyong, Ren Jianwei, Wan Zhi, *et al.*. Research of large aperture integrating sphere used in the radiative calibration for space remote sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(3): 464-469.  
李葆勇, 任建伟, 万 志, 等. 一种空间相机辐射定标用大面积辐射光源的研制[J]. 光电子·激光, 2013, 24(3): 464-469.
- 9 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiometry Photometry Colorimetry Theory and Measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 185.  
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, 2009. 185.
- 10 Xu Yanjun, Qi Yingchun, Ren Jianyue. Thermal analysis of space electronic sensor system [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2009, 25(2): 12-15.  
许艳军, 齐迎春, 任建岳. 空间遥感器电子学系统热分析[J]. 电子机械工程, 2009, 25(2): 12-15.
- 11 Su Keqiang, Chen Changzheng, Ren Jianyue, *et al.*. Thermal design of solar simulation xenon lamp array used in vacuum [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(6): 489-494.  
苏克强, 陈长征, 任建岳, 等. 真空罐内应用的太阳模拟灯阵列热设计[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(6): 489-494.

栏目编辑: 韩 峰