

# 宽动态范围红外积分球辐射源的设计与检测

张梦雅<sup>1,2</sup>, 袁银麟<sup>1\*</sup>, 翟文超<sup>1</sup>, 孟凡刚<sup>1</sup>, 夏茂鹏<sup>1</sup>, 吴浩宇<sup>1</sup>, 郑小兵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 为满足红外传感器高精度定标和性能测试的要求,设计了一种高均匀性和宽辐射动态范围的红外积分球辐射源。积分球辐射源采用碳纤维石英电热管作为红外辐射介质,工作波段覆盖 3~15  $\mu\text{m}$ 。利用积分球的空腔辐射理论和黑体辐射理论,提出子母镀金积分球串联的匀光方式,有效提高了红外积分球的均匀性。通过设计程控镀金光阑实现了动态范围的线性调节。建立了温度变化与辐射源辐亮度输出稳定性之间的关系,并确定了子母镀金积分球的温控精度。对红外积分球的特性进行分析与检测,结果表明:红外积分球出光口法线  $\Phi 200$  mm 范围内的面均匀性为 98.87%, $-15^\circ\sim 15^\circ$ 内竖直方向上的角度均匀性为 99.69%,实现了动态范围的近线性可调功能,背景辐射小于同温度的黑体,非稳定性为 0.16%,表现出较好的性能。红外积分球定标光源是传统黑体辐射源的有效补充,在红外传感器的实验室光谱辐射定标中具有潜在的应用价值。

**关键词** 遥感; 辐射定标; 红外; 积分球; 辐射源; 传感器

中图分类号 O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0612006

## Design and Test of Infrared Integrating Sphere Radiation Source with Wide Dynamic Range

Zhang Mengya<sup>1,2</sup>, Yuan Yinlin<sup>1\*</sup>, Zhai Wenchao<sup>1</sup>, Meng Fangang<sup>1</sup>,

Xia Maopeng<sup>1</sup>, Wu Haoyu<sup>1</sup>, Zheng Xiaobing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** In this study, an infrared integrating sphere radiation source with high uniformity and wide dynamic range is designed to satisfy the high-precision calibration and performance testing requirements of infrared remote sensors. The designed radiation source adopts a carbon fiber quartz electric heating tube as the infrared radiation medium. The sphere's working band covers 3-15  $\mu\text{m}$ . Based on the cavity radiation theory of integrating spheres and the blackbody radiation theory, the uniform-light mode of child and parent gold-plated integrating spheres is proposed. The proposed mode effectively improves the uniformity of the infrared integrating sphere. A programmable gold-plated aperture is also designed to realize the linear adjustment of the dynamic range. The relationship between temperature variation and radiance output stability and the temperature control accuracy of the child and parent gold-plated integrating spheres are determined. Characteristics of the infrared integrating sphere are analyzed and tested. Results reveal that the uniformity of the infrared integrating sphere in the area of  $\Phi 200$  mm of the normal at the light exit is 98.87%, the angular uniformity from  $-15^\circ$  to  $15^\circ$  in vertical plane is 99.69%, the dynamic range is nearly linearly adjustable, the background radiation is less than blackbody radiation at the same temperature, and the instability is 0.16%. These results demonstrate that the infrared integrating sphere possesses excellent performance. The infrared integrating sphere calibration source is an effective supplement to the traditional blackbody radiation source and has potential application value in the laboratory spectral radiometric calibration of infrared remote sensors.

**Key words** remote sensing; radiometric calibration; infrared; integrating sphere; radiation source; remote sensor

**OCIS codes** 010.5630; 120.3150; 300.6350; 280.4788

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(41605021)、中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ2018QN4)

\* E-mail: ylyuan@aiofm.ac.cn

# 1 引 言

积分球辐射源是实验室辐射定标系统中的关键设备之一,具有高稳定性和高均匀性等优良的辐射特性,可满足遥感器全光路、全孔径、全视场、全动态范围等的辐射定标要求<sup>[1-2]</sup>。通过调节积分球辐射源的参考辐亮度输出,结合基于探测器的标准传递技术,可准确建立遥感器的响应与标准入射辐亮度之间的定量化关系<sup>[1-2]</sup>,实现遥感器非线性、非稳定性和噪声等效光谱辐亮度(NESR)等性能的检测和评估,提高绝对辐射定标的精度。

目前,积分球辐射源在太阳反射波段的研制和应用技术已相对成熟,并已广泛应用于实验室辐射定标。例如,袁银麟课题组<sup>[3-4]</sup>研制的大口径光谱可调积分球在太阳反射波段可实现辐亮度输出均匀性高于99%,且已成功应用于高分5号载荷大气气溶胶多角度偏振探测仪的实验室辐射定标<sup>[5]</sup>。虽然积分球辐射源在太阳反射波段已有很多成功的应用案例,但在红外波段的相关研制方法和应用相对较少,目前见诸报道的有:Bagnasco<sup>[6]</sup>等利用镀金积分球开展了詹姆斯韦布太空望远镜搭载的近红外多目标色散光谱仪(NIRSpec)的辐射定标;美国 Labsphere 光学公司<sup>[7]</sup>研制了镀金激光功率测量球,该球自带高效散热系统,可以收集高度发散或准直光源发出的总辐射功率。国内中工实科(北京)科技有限公司<sup>[8]</sup>采用外部导入高功率激光的方法研制了镀金积分球,但其一般仅用于光功率测量和反射测试。用于辐射定标的红外积分球辐射源的研制方法仍需探索,其中主要的难点在于如何实现高均匀性、宽动态范围可调、高稳定性和低背景辐射输出等关键技术,具体表现为:1)均匀性设计难题。积分球良好的均匀性输出主要通过控制开口比和涂层反射率实现<sup>[9]</sup>,其中开口比应低于5%,涂层反射率应高于94%。而目前积分球辐射源在红外波段大多使用镀金涂层,其光谱反射率约为92%。2)红外辐射单元设计难题。目前红外积分球可用的红外辐射介质多为自发辐射工作机制,辐射功率输出是温度和面积的函数,电功耗、尺寸和体积都较大。设计时应考虑辐射源最佳的工作色温、结构形状和驱动散热等因素。3)动态范围可调设计难题。为方便遥感器非线性和动态范围的测试,红外积分球应具备色温不变辐亮度输出动态范围近线性可调功能。4)背景辐射抑制难题。为了兼顾红外遥感器的定标条件,需解

决背景辐射干扰抑制难题,设计红外积分球在真空低温下工作。

针对上述设计难题,本课题组根据积分球的空腔辐射理论和黑体辐射理论,提出了一种红外积分球辐射源设计方案,介绍了辐射源的总体设计、辐射单元设计、均匀性设计和动态范围调节设计等设计方案,并对辐射源的辐射特性进行了分析与检测。采用碳纤维石英电热管为红外辐射介质,结合子积分球设计红外辐射单元,通过镀金可调光阑和恒流驱动电源,实现色温动态范围的近线性可调,并对积分球辐射源的输出光谱辐亮度、动态范围、背景辐射和辐亮度输出稳定性进行了分析和检测。本文所设计的积分球辐射源可作为红外遥感器实验室辐射定标的关键设备。

## 2 红外积分球辐射源的研制

### 2.1 总体设计

红外积分球辐射源主要由4组专用的红外辐射单元、行程为80 mm的程控镀金可调光阑,以及内径为600 mm、出光口直径为250 mm的母镀金积分球组成,其中红外辐射单元由内径为150 mm、出光口直径为75 mm的子镀金积分球和碳纤维石英电热管组成,如图1所示。子母积分球外部均布置了蛇形制冷管道。

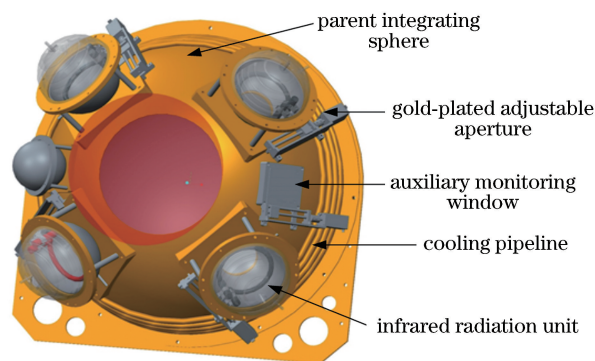


图1 红外积分球设计效果图

Fig. 1 Design rendering of infrared integrating sphere

红外辐射介质放在子积分球内,其发出的光在子积分球内进行一级匀光,随后进入母积分球进行二级匀光,最后在母积分球出光口处形成朗伯型辐亮度输出,供红外遥感器定标测试使用。调节光阑的开口大小可以改变母积分球出光口的辐亮度。

红外辐射介质系统的总体方案设计如图2所示,主要由控制主机、驱动电源、循环制冷温控模块、混合介质制冷模块和温度监测模块组成。

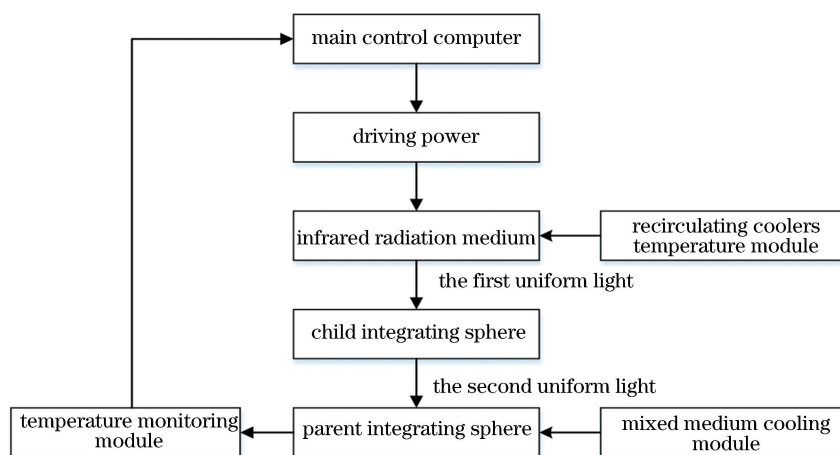


图 2 总体控制方案设计图

Fig. 2 Diagram of overall controlling plan

控制主机通过软件指令远程控制驱动电源,实现红外辐射介质的驱动控制和稳定工作,同时主机程序控制温度监测模块,实时测量积分球球体的工作温度。主机根据实时反馈信息调节驱动电流参数,配合循环制冷温控模块和混合介质制冷模块,保证辐射源输出的红外辐射处于恒定状态以及母积分球球体温度处于 155 K 以下。

循环制冷温控模块将红外辐射单元吸收的多余热量带走,有助于红外辐射介质形成热平衡条件,提高其使用寿命和稳定性。混合介质制冷模块采用液氮混合介质和铜管热沉调温方式,使母积分球的温度低于 155 K,减少干扰气体的吸收和自发辐射的

影响。在此温度下,探测器接收到的背景辐射远小于积分球辐射源的输出辐亮度,有效抑制了杂散光和背景辐射对待测仪器的影响。

### 2.2 红外辐射单元设计

红外辐射单元由子积分球和红外辐射介质组成,红外辐射介质固定在子积分球内。采用小口径的子镀金积分球对红外辐射介质进行匀光,其优点在于通过两级匀光提高辐亮度输出的均匀性。辐射单元采用循环制冷温控模块进行制冷,其过程为采用经过制冷的循环液体流经缠绕在积分球球体上的铜管的方式对球体进行制冷。红外辐射单元结构示意图如图 3 所示。

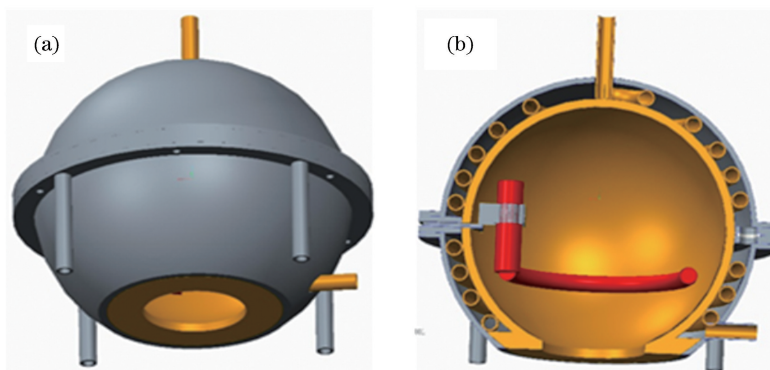


图 3 红外辐射单元结构示意图。(a)整体示意图;(b)剖面图

Fig. 3 Structural schematic of infrared radiation unit. (a) Overall view; (b) sectional view

红外辐射介质采用碳纤维石英电热管,由恒定直流驱动,波长范围覆盖  $3 \sim 15 \mu\text{m}$ ,工作温度在  $313 \sim 1473 \text{ K}$  范围内可随意调节,最高工作温度可达  $1673 \text{ K}$ 。

### 2.3 均匀性设计

积分球的均匀性分为面均匀性和角度均匀性。

根据中国科学院安徽光学精密机械研究所袁银麟等<sup>[10]</sup>的研究可知,沿积分球出光口的法线方向,将出光口平面上间隔均匀的各测点平面投影到积分球内壁的涂层区域,通过计算各测点投影区域的光谱辐亮度的相对标准偏差  $u_p$  来分析面均匀性,相对标准偏差的表达式为

$$u_p = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_e} \left( \frac{F_{\lambda\theta_i}}{\cos \theta_i} - \sum_{i=1}^{N_e} \frac{F_{\lambda\theta_i}}{N_e \cos \theta_i} \right)^2} / (N_e - 1)}{\sum_{i=1}^{N_e} \left( \frac{F_{\lambda\theta_i}}{N_e \cos \theta_i} \right) + 2M_\lambda \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_{\lambda\theta} \sin \theta d\theta}, \quad (1)$$

式中： $F_{\lambda\theta}$ 为红外辐射单元照明内壁涂层各测点投影区域的辐出度； $N_e$ 为出光口平面内有效测点数目； $\theta$ 为红外辐射单元中心法线与照明各测点光线的夹角； $M_\lambda$ 为母积分球的多次反射比因子。

角度均匀性通常采用各测点的光谱辐亮度的相对标准偏差  $u_a$  表示，如式(2)所示，即在水平平面和垂直平面内，等角度间隔测量出光口平面法线附近一定角度范围内的各个测点。

$$u_a = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_\theta} \left( \frac{F_{\lambda\theta_i}}{\cos \theta_i} - \sum_{i=1}^{N_\theta} \frac{F_{\lambda\theta_i}}{N_\theta \cos \theta_i} \right)^2} / (N_\theta - 1)}{\sum_{i=1}^{N_\theta} \frac{F_{\lambda\theta_i}}{N_\theta \cos \theta_i} + 2M_\lambda \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_{\lambda\theta} \sin \theta d\theta}, \quad (2)$$

式中： $N_\theta$ 为出光口平面法线附近一定角度范围内的测点总数目。

由(1)~(2)式可知：积分球辐射源的面均匀性和角度均匀性均与多次反射比因子  $M_\lambda$  和红外辐射单元的辐出度分布有关。 $M_\lambda$ 越大，越有利于提高积分球辐射源的均匀性， $M_\lambda$ 为涂层反射率  $\rho_\lambda$  和开口比  $f$  的函数：

$$M_\lambda = \frac{\rho_\lambda}{1 - \rho_\lambda(1 - f)}. \quad (3)$$

通常，开口比  $f$  应约束在一定范围内变化，一般要求小于5%。红外涂层的反射率  $\rho_\lambda$  为90%~92%， $M_\lambda$ 为6.2~7.3。在开口比相同的条件下，可见波段涂层材料的反射率高达95%~98%，相应的  $M_\lambda$  为14~16。因此，红外波段的  $M_\lambda$  值低于可见波段的  $M_\lambda$  值，这是影响红外积分球匀光效果的重要因素。

理论上，采用辐出度分布为  $F_{\lambda\theta} = F_{\lambda 0} \cdot \cos \theta$  的完全理想的朗伯型红外辐射单元时，积分球辐射源内壁涂层各处的光谱辐亮度相对标准偏差为0，均匀性会明显提升。

通常，小型红外辐射单元的辐出度分布更接近点辐射源，其辐出度各向基本相同，即  $F_{\lambda\theta} = F_{\lambda 0}$ ，它一般安装在积分球出光口法线附近( $-15^\circ \sim -20^\circ$ ,  $15^\circ \sim 20^\circ$ )，这样才能得到较好的匀光效果<sup>[10-11]</sup>。红外辐射介质发出的光经子积分球初步匀光后，其辐出度分布接近朗伯型，通过母积分球进一步匀光后可使红外波段获得与可见波段等效的匀光效果，其

均匀性明显提升。图4为母积分球输出角度均匀性分布的模拟效果图， $\theta_1$ 为子积分球偏离出光口法线方向的角度。从图4中可以看出， $\theta_1$ 越小，即子积分球的安装位置越靠近母积分球开口处，匀光效果越好。

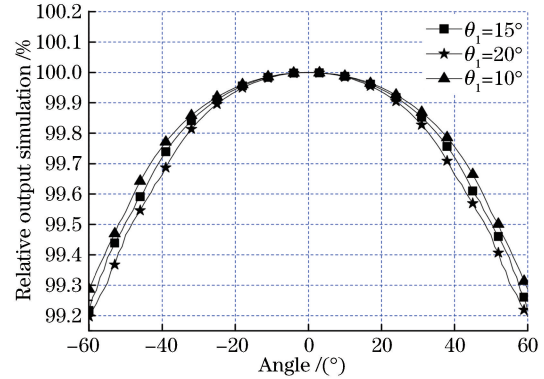


图4 母积分球的匀光效果图

Fig. 4 Uniform-light effect of parent integrating sphere

## 2.4 宽动态范围调节设计

根据普朗克定律，当温度升高时，辐亮度峰值向短波方向移动，导致大部分辐射通量聚集在短波处，产生大量无效热量<sup>[12]</sup>。表1为红外辐射介质在不同色温下3~14  $\mu\text{m}$  波段内的红外辐射效率，可以看出：当红外辐射介质温度在2800~3200 K时，3~14  $\mu\text{m}$  波段内的红外辐射占总辐射的比值为0.09~0.12；当红外辐射介质温度在700~1200 K时，3~14  $\mu\text{m}$  波段内的红外辐射占总辐射的比值为0.58~0.91。相比于高色温，低色温下红外辐射介质的辐射利用率会有很大提升，因此红外辐射介质采用700~1200 K的色温设计。

在子积分球的入口位置处加可调光阑，利用步进电机等间距控制光阑的位置，通过改变光阑的开口大小控制进入积分球的辐射通量，进而改变出光口的输出辐亮度。光阑可线性调节，其积分球的输出辐亮度也呈线性变化。这种设计可以保证不因驱动电流的改变而导致出射光色温发生变化，可以实现等色温线性调节。电动光阑示意图如图5所示。

## 3 辐射特性的分析与检测

### 3.1 辐亮度输出均匀性的分析与检测

将红外辐射计固定在积分球几何特性测试系统的角度特性<sup>[13]</sup>测量台上，调节红外辐射计，其光轴垂直于积分球出光口法线时为0°位置，在垂直方向上以1°为间隔旋转探测器进行测量，有效测量角度范围为 $-15^\circ \sim 15^\circ$ ，取各角度采样4次的均值作为

表 1 不同色温下 3~14 μm 波段内的红外辐射效率

Table 1 Efficiency of infrared radiation in band of 3-14 μm at different color temperatures

Color temperature /K	Peak wavelength /μm	Integral radiance /( $W \cdot cm^{-2}$ )		Efficiency
		3-14 μm	0.1-14 μm	
700	4.15	1.0132	1.1149	0.9087
800	3.63	1.6609	1.9540	0.8500
900	3.23	2.4980	3.1855	0.7842
1000	2.91	3.5194	4.9137	0.7162
1100	2.64	4.7140	7.2550	0.6498
1200	2.42	6.0674	10.3382	0.5869
2800	1.04	39.7255	312.9849	0.1269
2900	1.01	42.2158	360.2258	0.1172
3000	0.98	44.7287	412.6180	0.1084
3100	0.94	47.2622	470.5228	0.1004
3200	0.92	49.8146	534.3137	0.0932

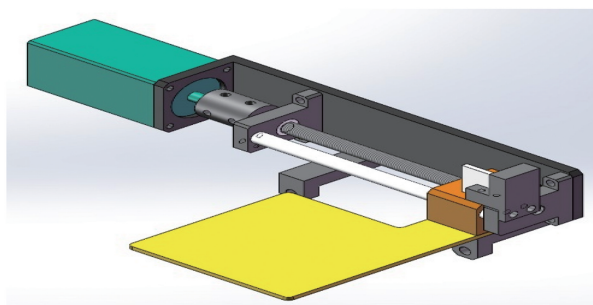


图 5 电动光阑示意图

Fig. 5 Schematic of electric aperture

该角度下的测量值。-15°~15°范围内竖直方向均匀性测量数据如图 6 所示。图 6 的纵坐标为红外辐射计的电流值,其平均值  $\bar{I}$  为 0.369,标准偏差  $S_{td}$  为 0.001126,角度均匀性为  $1 - \frac{S_{td}}{\bar{I}} = 99.69\%$ 。

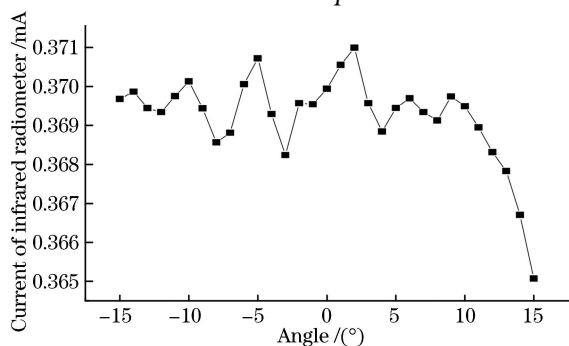


图 6 竖直方向角度均匀性测量结果

Fig. 6 Measurement result of angular uniformity in vertical plane

将红外辐射计固定在积分球几何特性测试系统<sup>[13]</sup>的二维平移台上,其光轴垂直于出光口平面。分别沿水平方向(X轴)和竖直方向(Y轴)移动红外辐射计,进行网格状测量,各测点采样4次取均值。面均匀性测量结果如图 7(b)所示,其平均值  $I$  为 0.361,标准偏差  $S_{td}$  为 0.004,面均匀性为  $1 - \frac{S_{td}}{I} = 98.87\%$ 。

积分球在出光口法线  $\Phi 200$  mm 范围内的均匀性为 98.87%,在出光口法线 -15°~15°范围内竖直方向上的均匀性为 99.69%,有利于降低红外遥感器辐射定标过程中位置及方向偏差引起的定标不确定度。

### 3.2 辐亮度输出动态范围的分析与检测

根据红外辐射理论<sup>[14]</sup>,红外辐射介质的辐射功率为

$$\Phi_L(\lambda, T_L) = \epsilon_L A_L F(\lambda, T_L), \quad (4)$$

式中: $\epsilon_L$ 为红外辐射介质的发射率, $\epsilon_L = 0.9$ ;  $A_L$ 为红外辐射介质的表面积;  $T_L$ 为红外辐射介质的温度,  $T_L = 700 \sim 1200$  K;  $F(\lambda, T_L)$ 为  $T_L$ 时的辐出度。

同理,子镀金积分球自发辐射功率可用红外辐射介质的发射率、积分球的内表面积和辐出度表示,即:

$$\Phi_{sp1}(\lambda, T_{sp1}) = \epsilon_G A_{sp1} F(\lambda, T_{sp1}), \quad (5)$$

式中: $\epsilon_G$ 为积分球内涂层的发射率, $\epsilon_G = 0.08$ ;  $A_{sp1}$ 为子镀金积分球的表面积;  $T_{sp1}$ 为子镀金积分球的温度,  $T_{sp1} = 300$  K;  $F(\lambda, T_{sp1})$ 为  $T_{sp1}$ 时的辐出度。

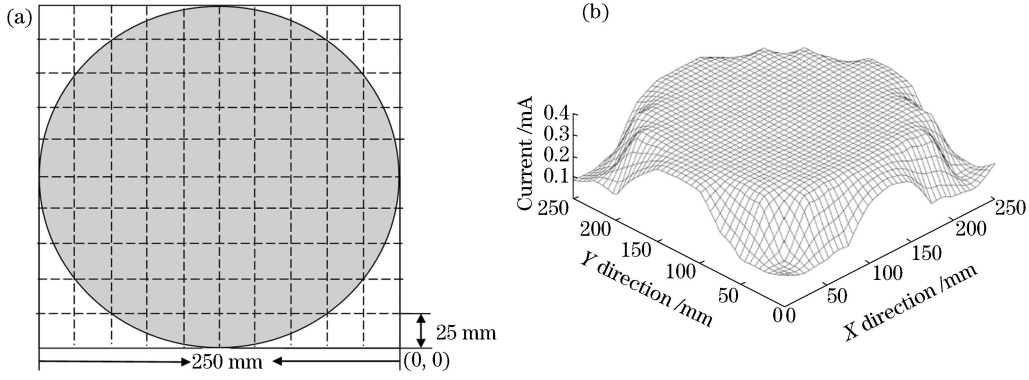


图 7 面均匀性测量。(a)示意图;(b)测量结果

Fig. 7 Measurement of planar uniformity. (a) Schematic; (b) measurement result

母镀金积分球自发辐射功率为

$$\Phi_{sp2}(\lambda, T_{sp2}) = \epsilon_G A_{sp2} F(\lambda, T_{sp2}), \quad (6)$$

式中:  $A_{sp2}$  为母镀金积分球的表面积;  $T_{sp2}$  为母镀金积分球的温度,  $T_{sp2} = 155 \text{ K}$ ;  $F(\lambda, T_{sp2})$  为  $T_{sp2}$  时的辐出度。

由积分球的空腔辐射理论可知, 出光口直径为 250 mm 的母积分球的输出辐亮度为

$$L_{out}(\lambda, T) = \{[\Phi_L(\lambda, T_L) + \Phi_{sp1}(\lambda, T_{sp1})] \times M_1 f_1 + \Phi_{sp2}(\lambda, T_{sp2}) \cdot M_2\} / (\pi \cdot A_{sp2}), \quad (7)$$

式中:  $M_1$  为子积分球的多次反射比,  $M_1 = 6.691$ ;  $M_2$  为母积分球的多次反射比,  $M_2 = 7.125$ ;  $f_1$  为子积分球的开口比,  $f_1 = 6.25\%$ 。

当红外辐射介质温度  $T_L$  为 700~1200 K 时, 相同辐射功率下母积分球的输出光谱辐亮度如图 8 所示。

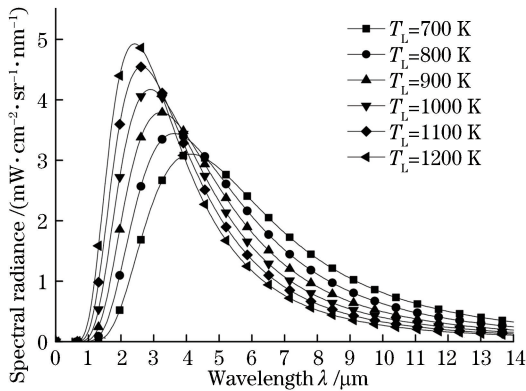


图 8 不同辐射介质温度下母积分球的输出光谱辐亮度

Fig. 8 Output spectral radiance of parent integrating sphere at different radiation medium temperatures

依次打开积分球辐射源 4 组、3 组、2 组、1 组的碳纤维石英电热管, 调节电源输出为 200 V 和 3 A, 利用傅里叶光谱仪每隔 1 s 测量 36 次光谱辐亮度  $L(\lambda, i)$  数据。每一种挡位下的光谱辐亮度平均值为

$$\bar{L}(\lambda) = \frac{1}{36} \left[ \sum_{i=1}^{36} L(\lambda, i) - \sum_{i=1}^{36} D(\lambda, i) \right], \quad (8)$$

式中:  $\bar{L}(\lambda)$  为 4 种挡位下的光谱辐亮度平均值;  $L(\lambda, i)$  为每种挡位下每次测量的光谱辐亮度值;  $D(\lambda, i)$  为关闭 4 组碳纤维石英电热管后测得的本底光谱辐亮度。4 组挡位下母积分球的输出光谱辐亮度如图 9 所示, 可以看出, 红外积分球辐射源等色温、辐亮度动态范围线性可调, 可为红外遥感器的非线性测量提供便利。

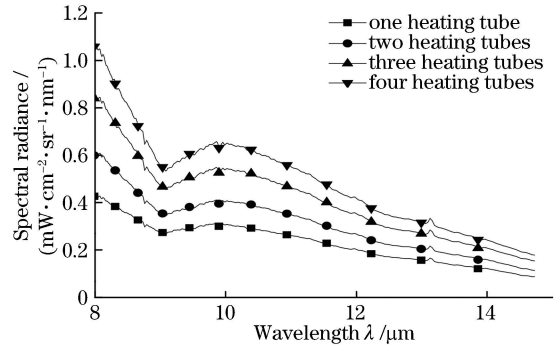


图 9 4 组挡位下母积分球的输出光谱辐亮度

Fig. 9 Output spectral radiance of parent integrating sphere in four magnitude levels

### 3.3 背景辐射的分析与检测

母积分球自发辐射的辐亮度为

$$L_{sp2}(\lambda, T_{sp2}) = \frac{\Phi_{sp2}(\lambda, T_{sp2})}{\pi \cdot A_{sp2}} \cdot M_2 = \frac{\epsilon_G F(\lambda, T_{sp2}) \cdot M_2}{\pi}, \quad (9)$$

式中:  $\Phi_{sp2}(\lambda, T_{sp2})$  为母积分球的自发辐射功率。

当母积分球温度  $T_{sp2} = 155 \text{ K}$  时, 其自发辐射辐亮度和 155 K 黑体辐射辐亮度如图 10(a) 所示。

图 11 为母积分球温度为 155 K 和 298 K 时背景辐射占出口辐亮度的比值。从图 11 可以看出: 当母积分球温度从 298 K 降到 155 K 时, 背景辐射占

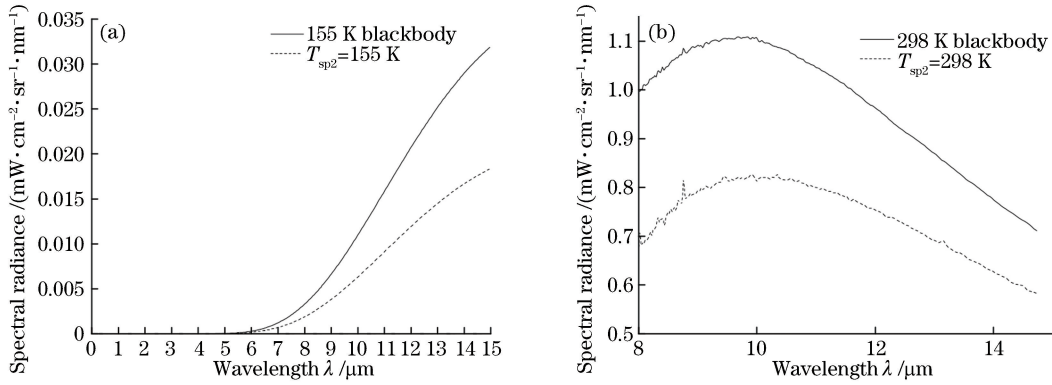


图 10 母积分球自发辐射辐亮度和黑体辐射辐亮度。(a)模拟值,  $T_{sp2} = 155\text{ K}$ ; (b)实测值,  $T_{sp2} = 298\text{ K}$

Fig. 10 Parent integrating sphere spontaneous radiation and blackbody radiation.

(a) Simulated value,  $T_{sp2} = 155\text{ K}$ ; (b) measured value,  $T_{sp2} = 298\text{ K}$

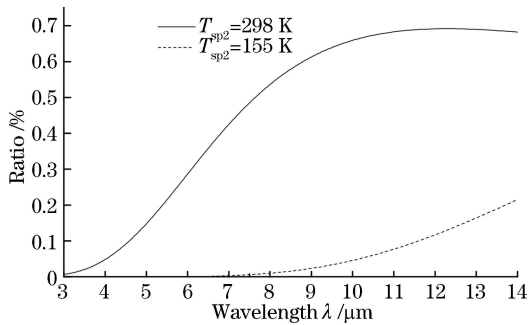


图 11 母积分球温度为 155 K 和 298 K 时背景辐射占出口辐亮度的比值

Fig. 11 Ratio of background radiation to output radiance when temperatures of parent integrating sphere are 155 K and 298 K, respectively

出口辐亮度的比值有明显下降。

黑体的光谱辐亮度  $L_B$  为

$$L_B = \frac{\epsilon F(\lambda, T)}{\pi}, \quad (10)$$

式中:  $\epsilon$  为黑体的发射率,  $\epsilon = 0.99$ ;  $T$  为黑体温度。则母积分球自发辐射的辐亮度与黑体光谱辐亮度之比为<sup>[15]</sup>

$$\frac{L}{L_B} = \frac{\epsilon_G F(\lambda, T) \cdot M_2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{\epsilon F(\lambda, T)} = \frac{\epsilon_G \cdot M_2}{\epsilon}. \quad (11)$$

从(11)式中的可以看出:母积分球自发辐射的辐亮度与黑体光谱辐亮度之比是涂层发射率、多次反射比的函数,其中镀金涂层的发射率  $\epsilon_G$  为 0.08,多次反射比  $M_2$  为 7.125。经核算,母积分球自发辐射的辐亮度与同温度黑体辐射之比为 0.58,是一个小于 1 的常数。在红外遥感的定标过程中,对母积分球进行制冷温控,可将其作为冷辐射背景使用。

因未在真空仓内进行测试,故在常温常压条件下利用制冷机将母积分球温度  $T_{sp2}$  控制在 298 K,关闭 4 组碳纤维石英电热管,采用傅里叶光谱仪测量积分球的本底光谱辐亮度,并利用傅里叶光谱仪测量 298 K EOI(Electro Optical Industries)黑体的辐亮度,测量结果如图 10(b)所示。从图 10(b)中可以看出:298 K 时积分球自发辐射的辐亮度与黑体辐亮度之比为 0.7~0.8,大于模拟值 0.56。初步分析是因为:1)在常温常压条件下测试时,部分辐射从出光口进入积分球内,经多次反射后其信号被傅里叶光谱仪探测到,导致本底数值偏大;2)大气在红外波段存在一定的自发辐射;3)设计与加工的积分球镀金涂层反射率  $\rho_\lambda$  存在偏差。但总体来讲,在相同的温度控制条件下,所设计的红外积分球背景辐射小于同温度黑体的背景辐射。

### 3.4 辐亮度输出稳定性的分析与检测

当红外辐射介质温度波动时,辐射源色温会发生变化,从而引起输出辐亮度的变化,对辐亮度输出稳定性产生一定影响。根据(4)式分析了红外辐射介质温度  $T_L$  为 700~1200 K 时,温度变化 0.5 K 对光谱辐射通量的影响,结果如图 12(a)所示。从图 12(a)中可以看出,当红外辐射介质温度为 700~1200 K 时,光谱辐射通量的非稳定性均小于 0.5%,且红外辐射介质的工作温度越高,输出稳定性越好。根据(7)式分析了在红外辐射介质温度  $T_L$  为 700 K 的条件下,温度变化 0.25, 0.5, 0.75, 1 K 对辐射源系统辐亮度输出稳定性的影响程度,如图 12(b)所示,可以看出,所设计的红外辐射介质的工作温控精度  $\Delta T_L$  优于 0.5 K,可保证辐射源系统的非稳定性小于 0.5%。

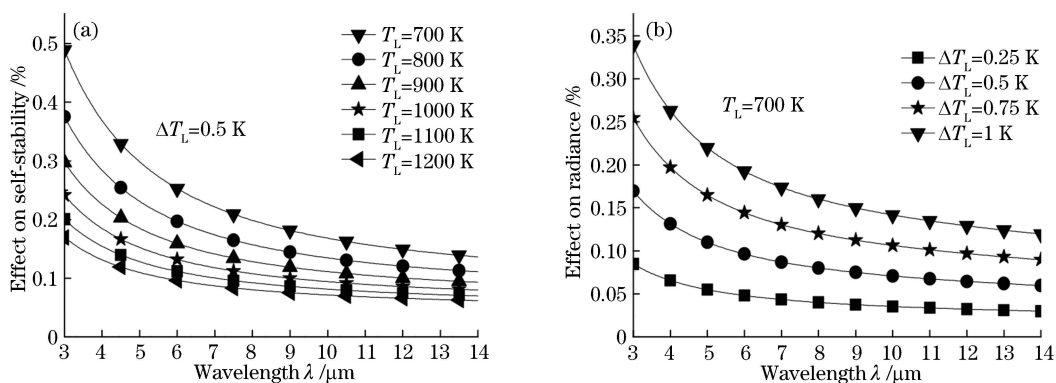


图 12 红外辐射介质温度控制精度。(a)  $\Delta T_L$ 对光谱辐射通量非稳定性的影响；  
(b)  $\Delta T_L$ 对辐射源系统辐亮度输出非稳定性的影响

Fig. 12 Temperature control accuracy of infrared radiation medium. (a) Effect of  $\Delta T_L$  on instability of spectral radiant flux; (b) effect of  $\Delta T_L$  on radiance output instability of radiation source system

同理,根据(7)式分析论证了子母积分球的温控精度要求,并给出了红外辐射介质、子积分球和母积分球温度精度分别为 0.5, 2, 1 K 时,辐射源系统光谱辐亮度非稳定性输出情况,结果如图 13 所示。从图 13 中可以看出:在 3~12.5  $\mu\text{m}$  波段,红外辐射介质温控精度对辐射源系统输出辐亮度的影响最大;在 12.5~14  $\mu\text{m}$  波段,母积分球的温控精度对辐射源系统输出辐亮度的影响最大。

目前,红外辐射介质采用高精度程控直流电源恒流驱动,以保证其输出温度的稳定性。根据直流电源电流输出的稳定性,结合自发辐射经验模型可知红外辐射介质自身平衡后的温度波动不超过 0.5 K。子积分球采用制冷管道和高精度循环制冷设备进行温度控制,并布置 pt100 铂电阻温度传感器进行实时反馈,保证子积分球的温控精度优于 2 K。

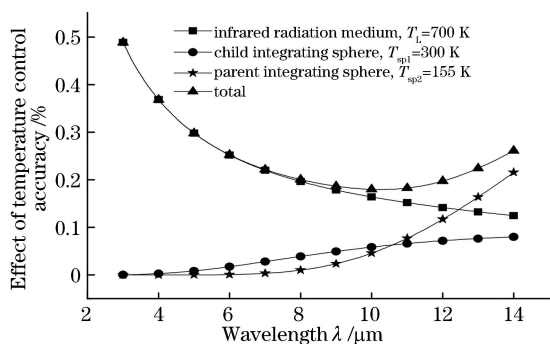


图 13 辐射源系统各部分温控精度对输出光谱辐亮度的影响

Fig. 13 Effect of temperature control accuracy of radiation source system on output spectral radiance

目前,母积分球采用蛇形紫铜管道和深冷电机进行制冷,结合比例-微分-积分(PID)温度控制算法

可实现母积分球的温控精度优于 1 K。在母积分球后半球不同区域布置了 12 个 pt100 铂电阻温度传感器,其中一个温度传感器用于温度信号的探测反馈,其余温度传感器用于实时监测积分球的温度场分布。铂电阻传感器在 15 min 内的反馈温度信号如图 14 所示,可以看出:母积分球在短时间内的温控精度可达 0.4 K,证明了母积分球温度控制方法的有效性。

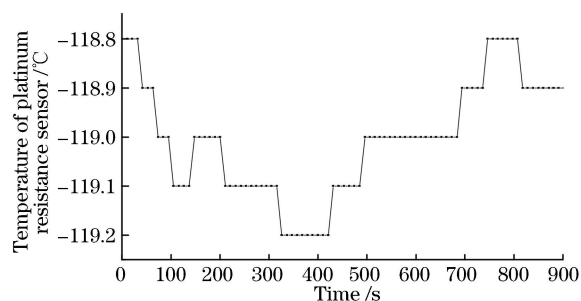


图 14 铂电阻温度传感器 15 min 内的数据

Fig. 14 Data of platinum resistance temperature sensor within fifteen minutes

通过以上的温控方法可使积分球辐射源输出辐亮度达到优于 99.5% 的高稳定性。积分球辐射源的稳定性是指辐射源的计量特性随时间偏离的程度。将红外积分球辐射源打开后预热 30 min,使用红外辐射计间隔 1 s,测量 30 min 的稳定性数据,测试结果如图 15 所示,非稳定性为 0.16%,其中红外辐射计的光谱范围为 9~10  $\mu\text{m}$ 。

## 4 结 论

针对红外遥感器的定标与性能测试应用要求,提出了一种在低温真空背景下使用的高均匀性宽辐射动态范围红外积分球辐射源的设计方法,通过子



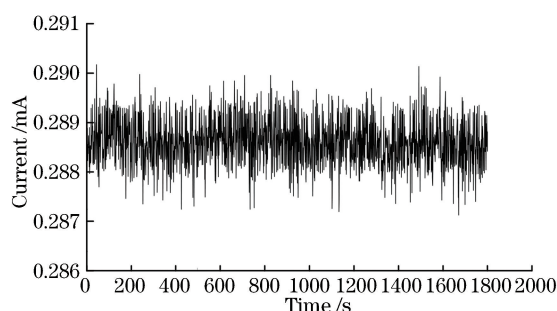


图 15 非稳定性测试结果

Fig. 15 Test results of instability

母球设计实现两级匀光,通过专用的镀金可调光阑实现动态范围调节。根据普朗克定律和空腔辐射理论,建立辐射特性输出模型,并进行辐亮度输出均匀性、动态范围、背景辐射和输出稳定性的分析与检测。结果表明:积分球辐射源的均匀性、辐亮度动态范围和非稳定性与分析结果相符,均达到了预期指标。积分球背景辐射比同温度下的黑体辐射低,但与分析结果相比偏大,可能是因为在常温常压条件下测试,部分环境背景辐射从出光口进入积分球内,经过多次反射后导致本底数值偏大。

设计、分析与检测结果表明:基于辐射特性输出模型设计的红外积分球辐射源在均匀性、动态范围线性调节和低辐射背景方面具有一定优点,在红外遥感器的实验室定标中具有一定的应用价值。下一步的研究工作是在真空低温条件下对积分球辐射源进行测试,并利用设计的红外积分球辐射源开展红外遥感器的辐射定标和 NESR 的定标示范性研究。

## 参 考 文 献

- [1] Qiao Y L, Zheng X B, Wang X H, *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.
- [2] Zheng X B. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 36-43.  
郑小兵. 高精度卫星光学传感器辐射定标技术[J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(5): 36-43.
- [3] Zheng X B, Yuan Y L, Xu Q Y, *et al.* New reference sources for radiometric calibration [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 101-107, 147.  
郑小兵, 袁银麟, 徐秋云, 等. 辐射定标的新型参考光源技术[J]. *应用光学*, 2012, 33(1): 101-107, 147.
- [4] 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.
- [5] Xie C Y, Li J J, Yuan Y L, *et al.* Measurement method of internal stray radiation in short-wave infrared channel of atmospheric corrector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0901002.  
谢臣瑜, 李健军, 袁银麟, 等. 大气校正仪短波红外通道内部杂散辐射测量方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0901002.
- [6] Bagnasco G, Ferruit P, Boeker T, *et al.* The on-ground calibration of the Near Infrared Spectrograph (NIRSpec) instrument on-board the James Webb Space Telescope (JWST) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7010: 701035.
- [7] Labsphere. Laser power measurement spheres [Z/OL]. [2019-01-09]. <http://www.labsphere.com.cn/admin/UploadFiles/product/2014812151748622.pdf>.
- [8] Integrating sphere [OL]. [2018-12-15]. <http://www.zgskis.com/bencandy.php?fid=90&id=122>.
- [9] Labsphere Inc. A guide to integrating sphere theory and applications [EB/OL]. [2018-12-15]. <http://www.labsphere.com.cn/uploads/technical-guides/a-guide-to-integrating-sphere-theory-and-applications.pdf>.
- [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] Zhang Z, Li X S, Wan Z, *et al.* Design and measurement of radiometric performance of ultra-large aperture uniform light source [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0410003.  
张钊, 李宪圣, 万志, 等. 超大口径均匀光源辐射性能设计与测试[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0410003.
- [12] Zhang J Q, Fang X P. *Infrared physics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 92-93.  
张建奇, 方小平. *红外物理* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 92-93.
- [13] Xie P, Wu H Y, Zheng X B, *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.

[14] Zhou T M, Zhou X, Cai W X. Principle & design of

light sources [M]. 2nd ed. Shanghai: Fudan University Press, 2006.

周太明, 周详, 蔡伟新. 光源原理与设计[M]. 2版. 上海: 复旦大学出版社, 2006.

[15] Jacquez J A, Kuppenheim H F. Theory of the integrating sphere[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1955, 45(6): 460-470.