

宽动态范围红外积分球辐射源的优化设计与性能测试(特邀)

黄思佳 袁银麟 翟文超 康晴 翁建文 李越 孟凡刚 郑小兵 雷正刚

Design optimization and performance test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range(Invited)

Huang Sijia, Yuan Yinlin, Zhai Wenchao, Kang Qing, Weng Jianwen, Li Yue, Meng Fangang, Zheng Xiaobing, Lei Zhenggang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210516>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星上红外遥感相机的辐射定标技术发展综述

Review of on-orbit radiometric calibration technology used in infrared remote sensors

红外与激光工程. 2019, 48(9): 904001–0904001(13) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0904001>

基于积分球分光与接收的透射式能见度测量系统

Transmission measurement system for visibility based on integrating sphere applied to light splitting and receiving

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1017003–1017003(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1017003>

基于灰阶靶标的高分辨光学卫星传感器在轨绝对辐射定标

On-orbit absolute radiometric calibration of high resolution satellite optical sensor based on gray-scale targets

红外与激光工程. 2018, 47(4): 417005–0417005(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0417005>

大动态范围微光相机的辐射定标

Radiometric calibration of large dynamic range low light level camera

红外与激光工程. 2019, 48(S1): 78–82 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.S117002>

基于二次修正提高宽动态红外辐射测量精度

Improvement of wide dynamic infrared radiation measurement accuracy based on dual correction

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200142–1–20200142–6 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200142>

超连续谱激光-单色仪在偏振遥感器定标中的影响因素分析

Influencing factors analysis of supercontinuum laser monochromator in calibration of polarization remote sensors

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200313–1–20200313–10 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200313>

宽动态范围红外积分球辐射源的优化设计与性能测试 (特邀)

黄思佳^{1,2}, 袁银麟^{3,4}, 翟文超^{3,4}, 康 晴^{3,4}, 翁建文^{3,4}, 李 越^{3,4}, 孟凡刚^{3,4}, 郑小兵^{3,4*}, 雷正刚²

1. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;
2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
3. 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;
4. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 为满足红外遥感器高精度等效噪声光谱辐亮度的定标要求, 在原有的设计基础上改进了红外积分球辐射源研制制造工艺, 满足真空低温使用要求。该积分球辐射源采用 8 组碳纤维石英电热管作为红外辐射介质, 实现工作波段覆盖 3~15 μm , 可调辐射动态范围提升 1 倍。设计了辐射定标与测量光路, 通过比对测量标准腔式黑体辐射源, 实现红外积分球辐射源真空低温条件下的辐射定标。定标结果表明: 红外积分球辐射源出光口法线 $\Phi 200\text{ mm}$ 范围内的面均匀性为 99.75%, $\pm 10^\circ$ 范围内的角度均匀性为 99.81%, 非稳定性为 0.05%。实现了红外积分球辐射源光谱辐亮度输出等色温近线性可调功能, 5 μm 和 10 μm 辐亮度可调范围分别达到 12.8 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 和 1.6 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ 。

关键词: 遥感器; 红外; 积分球; 辐射源; 辐射定标

中图分类号: O432.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210516

Design optimization and performance test of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range(*Invited*)

Huang Sijia^{1,2}, Yuan Yinlin^{3,4}, Zhai Wenchao^{3,4}, Kang Qing^{3,4}, Weng Jianwen^{3,4}, Li Yue^{3,4},
Meng Fangang^{3,4}, Zheng Xiaobing^{3,4*}, Lei Zhenggang²

1. School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
4. Hefei Institutes of Physical Science, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high-precision Noise Equivalent Spectral Radiance calibration of infrared remote sensors, the development and manufacturing process of the infrared integrating sphere radiation source were improved on the basis of the original design to meet the vacuum cryogenic use requirements. The integrating sphere radiation source used 8 sets of carbon fiber quartz electric heating tubes as the infrared radiation medium to achieve a working band coverage of 3-15 μm , and the adjustable radiation dynamic range was doubled. The radiation calibration reflective light path was designed, and the standard cavity blackbody

收稿日期: 2021-07-27; 修订日期: 2021-09-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504802); 国家自然科学基金 (41805019)

作者简介: 黄思佳, 男, 博士生, 主要从事多光谱、傅里叶光谱仪设计与制造相关领域的研究。

导师(通讯作者)简介: 郑小兵, 男, 教授, 博士, 主要从事光辐射精确测量、卫星遥感器的辐射定标技术、光学遥感技术等方面的研究。

radiation source was compared and measured to realize the radiation calibration of the infrared integrating sphere radiation source under vacuum and low temperature conditions. The calibration results show that the uniformity of the surface within the normal $\Phi 200$ mm of the infrared integrating sphere radiation source is 99.75%, the angular uniformity within $\pm 10^\circ$ is 99.81%, and the instability is 0.05%. It is the realization of the infrared integrating sphere radiation source spectral radiance output and color temperature near-linear adjustable function, $5\ \mu\text{m}$ and $10\ \mu\text{m}$ radiance adjustable range are up to 12.8 and $1.6\ \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$.

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

0 引言

等效噪声光谱辐亮度 (Noise Equivalent Spectral Radiance, NESR) 是衡量红外傅里叶变换光谱仪测量噪声水平的重要技术指标^[1], 表征其对红外目标信号的极限探测能力。NESR 定义为在特定光谱范围, 被测系统的噪声等于传感器入瞳处亮度的变化。目前红外傅里叶变换光谱仪 NESR 通过两种不同温度的黑体辐射源进行定标。这种 NESR 定标方法不确定度因素主要来源于黑体辐射源的辐射测温误差、均匀性、以及稳定性, 定标精度在 $2\ \text{K}$ 范围内^[2-3]。在常温常压条件下, 黑体辐射源的光谱辐亮度输出受水汽、 CO_2 等背景气体的吸收和发射影响, 导致无法正确定标部分波段的 NESR^[3-4]。

为满足红外傅里叶变换光谱仪等红外遥感器 NESR 定标, 笔者所在课题组前期设计的第一版真空低温环境使用的红外积分球辐射源^[5] 获得了良好的均匀性和稳定性, 但也存在一定的缺陷。第一版红外积分球辐射源主要受制于盘管挂锡工艺, 锡疫效应^[6] 导致仅适用于 $-50\ ^\circ\text{C}$ 以上的环境温度长时间工作。同时未完全实现粗糙球面的均匀镀金, 辐亮度输出均匀性和动态范围仍有一定的提升空间。第一版红外积分球辐射源内部的镀金层色差显著, 见图 1。

文中主要介绍第二版红外积分球辐射源的优化设计和研制工艺流程, 包括采用铜焊焊接材料, 显著提升红外积分球辐射源的环境工作温度适用范围; 采用 8 组碳纤维石英电热管作为红外辐射介质, 实现可调辐射动态范围提升 1 倍; 优化了镀金工艺, 提升了辐亮度输出动态范围和角度均匀性。文中同时介绍了第二版红外积分球辐射源应用工作流程和辐射定标与测量光路设计, 以及光谱辐亮度定标方法和定标精度。

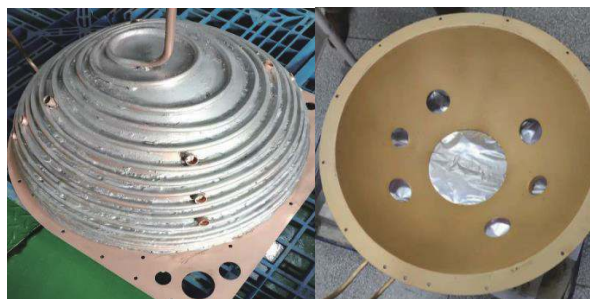


图 1 第一版红外积分球辐射源的盘管挂锡和真空镀金实物图

Fig.1 The first edition practical picture of coil tin hanging and vacuum gold-plating of infrared integrating sphere radiation source

1 宽动态范围红外积分球辐射源总体设计方案

宽动态范围红外积分球辐射源采用级联子母积分球工作机制, 以提升辐亮度高均匀性。使用小口径的级联子镀金积分球对红外辐射介质进行匀光, 实现进入级联母积分球的辐出度分布接近朗伯型。通过提高级联母积分球内部一次照明均匀性^[7], 实现辐亮度输出高均匀性, 其均匀性核算方法不再细述^[5]。

宽动态范围红外积分球辐射源总体控制方案如图 2 所示, 控制主机通过软件指令远程控制精密驱动电源, 实现红外辐射介质的驱动控制和稳定工作。通过采用循环酒精制冷机和复叠式制冷机, 分别实现级联子球和级联母球散热温控至 $(300 \pm 0.5)\ \text{K}$ 和 $(155 \pm 2)\ \text{K}$, 进而抑制和稳定级联母球内部的自发辐射。

在级联子积分球的出口位置处设计了程控可调镀金光阑, 通过改变镀金光阑的开口尺寸控制进入母积分球的辐射通量, 进而改变母积分球出光口的输出辐亮度。控制主机通过精密驱动电源的驱动电流和程控可调镀金光阑的开口尺寸调节, 实现宽动态范围红外积分球辐射源的等色温光谱辐亮度输出近线性可调。

宽动态范围红外积分球辐射源的结构设计效果

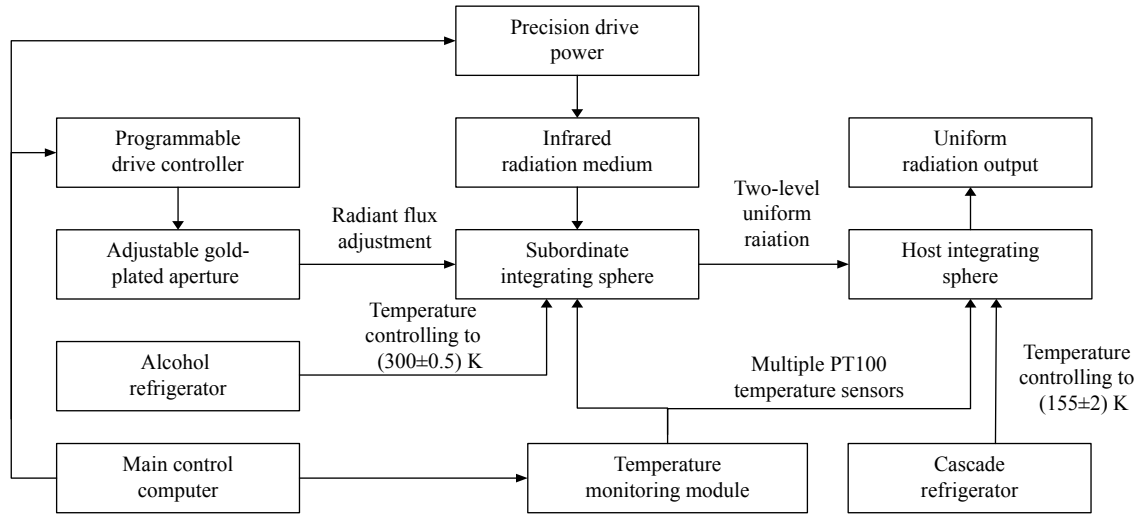


图 2 总体控制方案设计图

Fig.2 Design drawing of overall control scheme

如图 3 所示，由 4 组级联子球和 1 组级联母球组成。其中，级联母积分球的内径为 600 mm、出光口直径为 250 mm，级联子球内径为 150 mm、出光口直径为 75 mm。级联子球和母积分球均缠绕布置了散热铜管，采用焊接的方式实现铜管与积分球体一体成型。通过在铜管内部注入循环温控制冷的循环液体，可迅速散发红外辐射介质辐射产生的热量，实现积分球体的制冷。

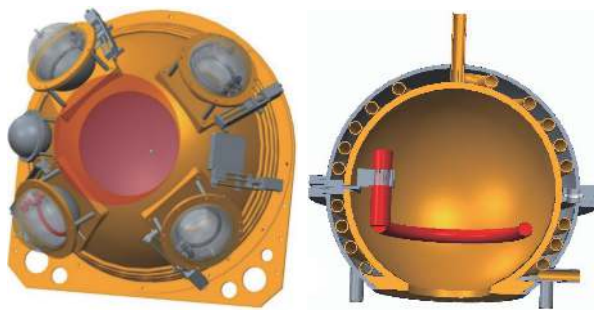


图 3 宽动态范围红外积分球辐射源结构设计效果图

Fig.3 Structure design of infrared integrating sphere emitter with wide dynamic range

1.1 光谱辐亮度输出动态范围的优化设计

红外积分球辐射源第一版设计采用了 4 组电功率 1 000 W 环形碳纤维石英电热管，10 μm 光谱辐亮度可调范围约为 0.6 μW/(cm²·sr·nm)，相当于 273 K 和 0 K 理想黑体的辐亮度之差。为了满足红外遥传感器的定标要求，红外积分球辐射源第二版主要通过增加碳纤维石英电热管的输入功率和提升镀金积分球的反

射率来提升光谱辐亮度输出动态范围，具体的分析过程如下。

根据红外辐射理论^[8]，红外辐射介质的辐射功率可用公式 (1) 表示为：

$$\Phi_L(\lambda, T_L) = \varepsilon_L A_L F(\lambda, T_L) \quad (1)$$

式中： ε_L 为红外辐射介质的发射率， $\varepsilon_L=0.9$ ； A_L 为红外辐射介质的表面积； $F(\lambda, T_L)$ 为红外辐射介质温度为 T_L 时的辐出度， $T_L=700\sim 1\,200$ K。

同理，级联子积分球自发辐射功率可用红外辐射介质的发射率、积分球的内表面积以及辐出度表示，如公式 (2) 所示：

$$\Phi_{sp1}(\lambda, T_{sp1}) = \varepsilon_G A_{sp1} F(\lambda, T_{sp1}) \quad (2)$$

式中： ε_G 为级联子积分球内涂层的发射率； A_{sp1} 为级联子积分球的表面积； $F(\lambda, T_{sp1})$ 为子级联积分球在温度为 T_{sp1} 时的辐出度， $T_{sp1} = 300$ K。

级联母积分球自发辐射功率可用公式 (3) 表示为：

$$\Phi_{sp2}(\lambda, T_{sp2}) = \varepsilon_G A_{sp2} F(\lambda, T_{sp2}) \quad (3)$$

式中： A_{sp2} 为级联母积分球的表面积； $F(\lambda, T_{sp2})$ 为级联母积分球在温度为 T_{sp2} 时的辐出度， $T_{sp2}=155$ K。

由积分球空腔辐射理论^[9]可知，级联母积分球的输出辐亮度可由公式 (4) 表示为：

$$L_{out}(\lambda, T) = \frac{[\Phi_L(\lambda, T_L) + \Phi_{sp1}(\lambda, T_{sp1})] \times M_1 f_1 + \Phi_{sp2}(\lambda, T_{sp2})}{\pi \cdot A_{sp2}} \cdot M_2 \quad (4)$$

式中： M_1 和级联 M_2 分别为级联子和母积分球的多次反射比因子； f_1 和 f_2 分别为级联子和母积分球的开口比，其数值分别为 6.25% 和 5.34%。

其中红外积分球辐射源的光谱辐亮度输出可调节动态范围可由公式 (5) 表示为：

$$L_{IS}(\lambda) = \frac{\Phi_L(\lambda, T_L) \cdot M_1 \cdot f_1 \cdot M_2}{\pi \cdot A_{sp2}} \quad (5)$$

根据公式 (5) 的推导，仅有镀金反射率由 ρ_2 变化至 ρ_1 时，积分球辐射源的光谱辐亮度的相对变化 $r_\rho(\lambda)$ 如公式 (6) 所示：

$$r_\rho(\lambda) = \frac{L_{IS}(\lambda, \rho_1)}{L_{IS}(\lambda, \rho_2)} = \frac{\rho_1^2 [1 - \rho_2(1 - f_1)1 - \rho_2(1 - f_2)]}{\rho_2^2 [1 - \rho_1(1 - f_1)1 - \rho_1(1 - f_2)]} \quad (6)$$

式中： f_1 和 f_2 为级联子和母积分球的开口比，其数值分别为 6.25% 和 5.34%。

镀金反射率 ρ_2 取值为 0.88，当镀金反射率 ρ_1 由 0.88~0.95 变化时，积分球辐射源的光谱辐亮度的相对变化 $r_\rho(\lambda)$ 曲线如图 4 所示。从图中可以看出，通过提升镀金反射率可显著提升光谱辐亮度的输出动态范围。

每组级联子积分球内置 2 组定制的电功率 800 W 环形碳纤维石英电热管。碳纤维石英电热管的结构组成为在石英管中放置一根碳纤维丝，并采用抽真空密封。在碳纤维丝上通入电压，使碳纤维丝发热而产生热辐射。碳纤维丝接近纯黑体材料，电热转换效率高达 95%。碳纤维石英电热管，工作温度在 400 ~ 1200 °C 范围可任意调节，最高工作温度高达 1400 °C。在常温常压条件下，对级联子积分球驱动 1 组碳纤维

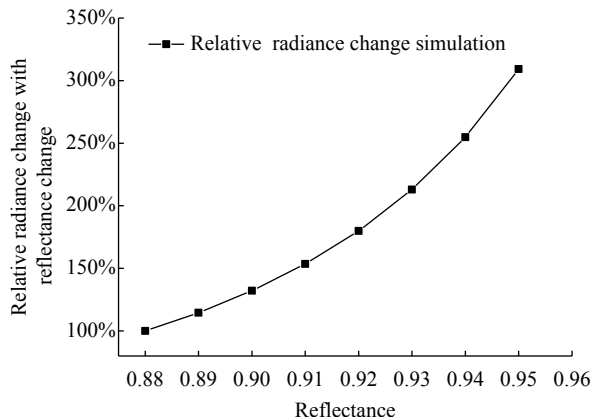


图 4 镀金反射率与多次反射比因子之间的关系

Fig.4 Relationship between reflectivity and multiple reflectance factor of gold-plating

石英电热管时，其光谱辐亮度输出如图 5 所示，光谱范围覆盖 3 ~ 15 μm 。

宽动态范围红外积分球辐射源第二版的研制工艺流程如图 6 所示，主要包括一次压铸成型级联子和母积分球体、焊接法兰和积分球体、盘管焊接、酸洗清洁、喷丸处理、真空镀金、结构和传感器安装，电气性能、真空性能和辐射性能测试。

第二版的研制工艺流程改进了铜管与铜球之间的焊接方式，优化了真空镀金环节。铜管与铜球之间采用铜焊焊接材料，该材料不会随温度降低产生结晶现象，能够显著提升红外积分球辐射源的环境工作温度的适用范围。真空镀金环节增加了干洁氮气干燥处理和离子溅射步骤，通过剥离铜层表面氧化层 20 nm，提高镀金层的附着力。图 7 示出的铜积分球

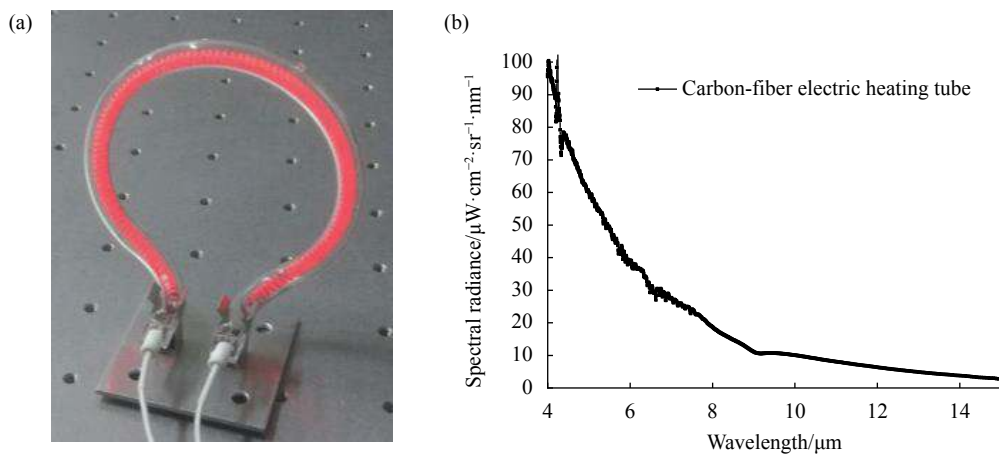


图 5 碳纤维石英电热管实物图和光谱输出

Fig.5 Physical picture and spectrum output of carbon fiber quartz electrothermal tube

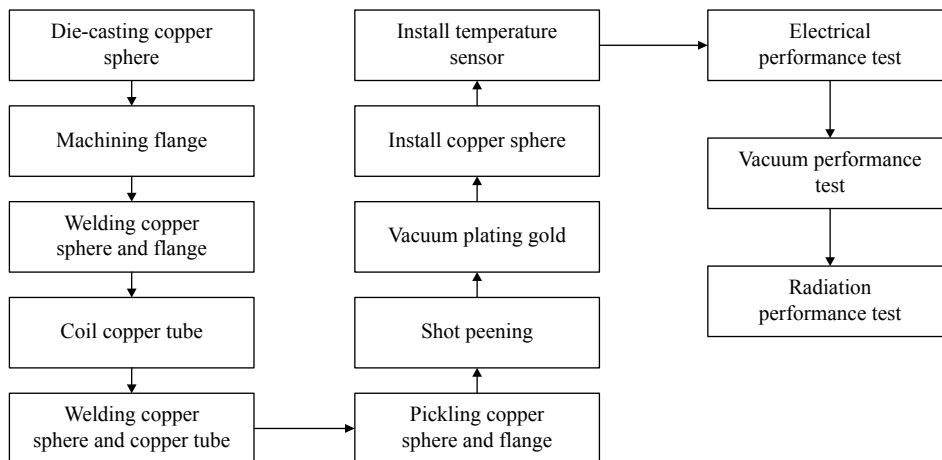


图 6 研制工艺流程设计

Fig.6 Design of development process



图 7 盘管焊接和积分球真空镀金效果实物图

Fig.7 Effect of coil welding and integrating sphere vacuum gold-plating

涂层采用真空蒸发镀金工艺,先镀铬再镀金。镀铬的目的是提高镀金表面光洁度和附着耐磨性。在高温锅钳放置 99.999% 的金粉,通过高温蒸发,配合积分球的旋转,实现镀金膜层厚度在 200~400 nm 范围内。

2 宽动态范围红外积分球辐射源辐射定标方案设计

为满足红外遥感器 NESR 定标要求,设计了红外积分球辐射源的高精度定标和应用工作流程,其示意图如图 8 所示。采用真空低温环境系统,为红外积分球辐射源、辐射定标与测量光路、被测红外遥感器提供无背景气体吸收发射干扰条件。被测红外遥感器安装于三维平移台上,通过平移切换交替测量红外积分球辐射源,实现 NESR 的精确定标。

设计辐射定标与测量光路具有视场切换功能,通过旋转平面镜等效观测标准腔型黑体和积分球辐射源。通过比对测量的方式实现红外积分球辐射源光

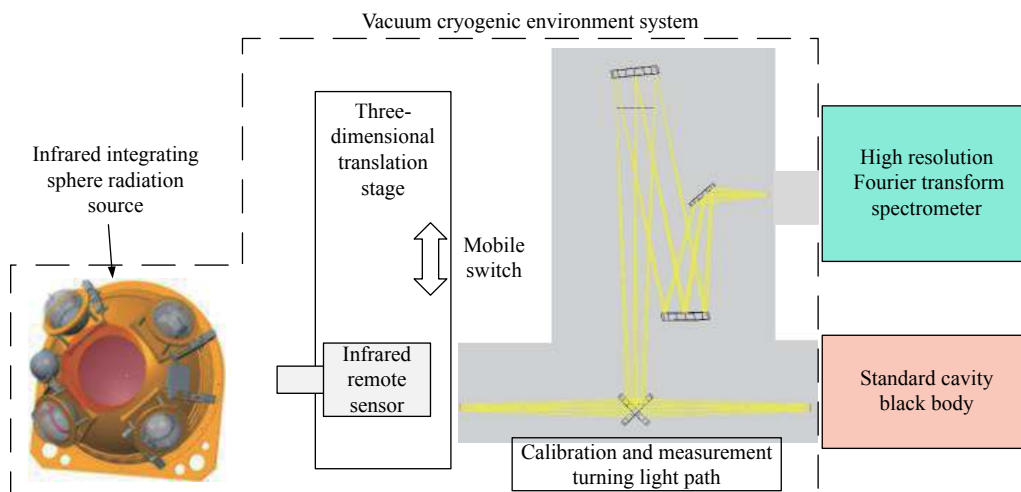


图 8 红外积分球辐射源的高精度定标和应用工作流程示意图

Fig.8 High precision calibration of infrared integrating sphere emitter and application workflow picture

谱辐亮度的高精度定标,其技术优势体现在:(1)辐射定标与测量的光路匹配等效;(2)以腔型黑体为标准辐射源,实现全光路定标,获取全光路的辐亮度定标系数。

辐射定标与测量光路方案采用单个离轴椭球面反射镜设计,光路由离轴椭球面反射镜、旋转平面反射镜和固定式平面反射镜组成。选择平面反射镜主要用来实现标准腔型黑体和红外积分球辐射源的切换。固定式平面反射镜主要完成光路的折叠,方便红外真空傅里叶变换光谱仪的空间布局。

由于红外真空傅里叶变换光谱仪的工作口径最大可达 $\Phi 40$ mm,标准腔型黑体的最大口径为 $\Phi 50$ mm,设计的转折光路视场为 $\Phi 30$ mm,均小于标准腔型黑体和红外真空傅里叶变换光谱仪的有效口径。主要基于以下两方面考虑:(1)标准腔型黑体温度非均匀性的影响。标准腔型黑体有效口径内中心区域均匀性较好,边缘逐渐变差,需要优先选择中心区域有效口径。(2)红外真空傅里叶变换光谱仪光路对准的便捷性。当光束未充满红外真空傅里叶变换光谱仪有效口径时,很容易通过位移台确定红外真空傅里叶变换光谱仪定位的中心位置。如果光束超出红外真空傅里叶变换光谱仪有效口径,则会引入杂散光。折中考虑上述两个因素后,取黑体有效口径的 60% 区域和红外真空傅里叶变换光谱仪有效工作口径的 80% 区域,即光路视场为 $\Phi 30$ mm。

考虑到 3~15 μm 红外辐射的高反射率,反射镜表面镀金膜。同时考虑到低温制冷过程中材料膨胀导致的光路偏移,反射镜元件材料选择熔融石英。所设计的椭球面反射镜顶点曲率半径为 2 163.15 mm (凹面),二次圆锥系数为 -0.04,非球面系数较小,较容易加工。离轴距离为 500 mm,离轴抛物面反射镜倾斜角度约为 10.7° 。物点(变温黑体出射面)距离离轴椭球面反射镜的距离为 2 656.4 mm,像点(傅里叶光谱仪入射口径)距离离轴椭球面反射镜的距离为 1 875 mm。转折光路工作相对口径为 $f/10$,离轴椭球面反射镜尺寸大小为 $\Phi 340$ mm,旋转平面反射镜尺寸为 $\Phi 120$ mm,固定式平面反射镜尺寸为 $\Phi 100$ mm。

单离轴椭球面反射镜设计方案的成像效果如图 9 所示,各视场均达到了衍射极限,可认为实现了理想成像。使用单离轴椭球面反射镜成像时,物距和像距不同,因此不是 1:1 成像,物面大小为 $\Phi 30$ mm

时,像面大小约为 $\Phi 20.3$ mm,小于红外真空傅里叶变换光谱仪的有效工作孔径。

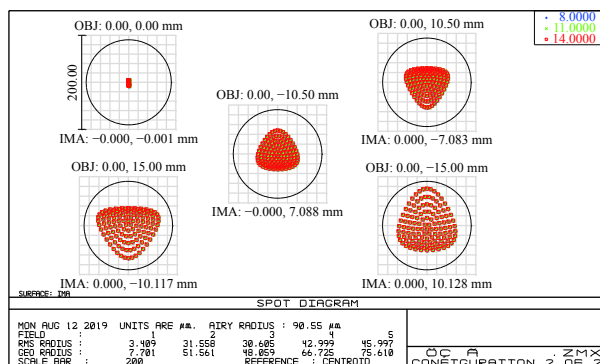


图 9 单离轴椭球面反射镜转折光路成像效果 ($\Phi 30$ mm)

Fig.9 Imaging effect of single off-axis ellipsoid mirror reflective light path ($\Phi 30$ mm)

3 宽动态范围红外积分球辐射源的性能测试

3.1 光谱辐亮度输出均匀性

采用红外辐射计和积分球几何特性测试系统^[10]实现红外积分球辐射源的面均匀性和角度均匀性测量(图 10)。将红外辐射计固定在积分球几何特性测试系统角度特性测量台上,在垂直和水平方向以 1° 间隔旋转探测器进行测量,有效测量角度范围为 $\pm 20^\circ$,调节红外辐射计测光轴垂直积分球出光口法线时处于 0° 位置。各角度点采样 4 次,取其平均值作为该角度测值 V_i 。 V_i 为扣除 36 次本底辐亮度 $D(i)$ 均值后的

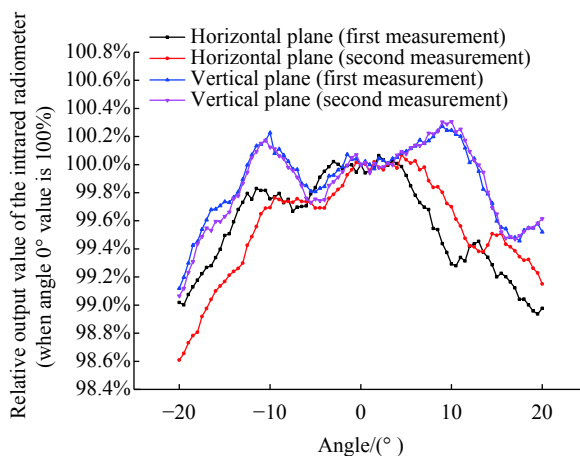


图 10 红外级联积分球第二版的面均匀性和角度非均匀性测量结果
Fig.10 Measurement result of surface uniformity and angular nonuniformity of the 2nd infrared cascade integrating sphere

数据。具体数据处理过程不再累述^[5]。

3.2 光谱辐亮度输出稳定性

红外辐射计测量红外积分球辐射源非稳定性时间为 30 min, 测量状态是红外积分球辐射源开 2 只灯, 工作电流为 3.5 A。红外辐射计测量红外积分球辐射源的响应平均值为 22 487.46, 标准差为 11.69, 计算稳定性为 $u_{11}(\lambda) = 99.94\%$ 。具体数据处理过程不再累述^[5]。如图 11 所示。

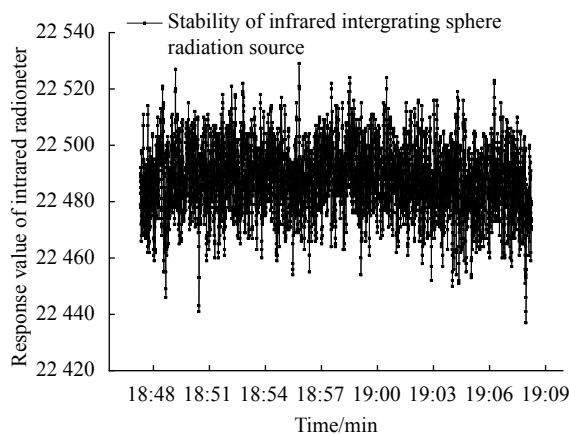


图 11 红外级联积分球第二版的非稳定性测量结果

Fig.11 Measurement result of instability of the 2nd infrared cascade integrating sphere

3.3 光谱辐亮度输出动态范围

通过辐射定标与测量光路等效观测标准腔型黑体和积分球辐射源的定标方法, 获取积分球辐射源的光谱辐亮度, 具体测量步骤如下: (1) 打开标准腔型黑体、红外积分球辐射源和傅里叶光谱仪并进行预热。(2) 在 300~360 K 范围, 间隔 20 K 依次调节标准腔型黑体光谱辐亮度输出, 采用傅里叶光谱仪进行辐射测量, 测量 36 次, 得到响应值 $S(B_k, \lambda, i)$, 计算 36 次响应值的平均值 $S(B_k, \lambda)$ 。(3) 根据标准腔型黑体的光谱辐亮度数据 $L(B_k, \lambda)$, 获取绝对辐亮度响应度定标系数 $K(\lambda)$ 。(4) 参考步骤 (2), 傅里叶光谱仪比对测量红外积分球辐射源, 并计算响应值的平均值 $S(IS, \lambda)$ 。(5) 根据输出的光谱辐亮度 $L_{IS}(\lambda)$, 测量次数为 36 次。数据处理方法如下:

理论上理想黑体辐射源的光谱辐射亮度^[11]可以由普朗克黑体辐射定律计算得到, 见公式 (7):

$$L_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\pi n^2 \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{n\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (7)$$

式中: $c_1=3.741 8 \times 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$; λ 为空气中的波长; n 为空气折射率; 单位为 μm ; $c_2=1.438 8 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$; T 为黑体辐射源的温度, 单位为 K。

实际标准腔型黑体的发射率均小于 1, 其表面还会反射来自环境的能量。标准腔型黑体出射的辐亮度^[12-13] $L(B_k, \lambda)$ 可以由公式 (8) 计算:

$$L(B_k, \lambda) = \varepsilon_{\lambda}(T)L_{\lambda}(T) + (1 - \varepsilon_{\lambda}(T))L_{\lambda}(T, bg) \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_{\lambda}(T)$ 为标准腔型黑体的光谱发射率; $L_{\lambda}(T, bg)$ 为标准腔型黑体所处的环境辐射亮度。

由于标准腔型黑体处于低温真空定标仓内, 其环境温度可实时测量且均匀分布, 因此, 环境辐射亮度的普朗克表达为公式 (9):

$$L_{\lambda}(T, bg) = L_{\lambda}(T_m) \quad (9)$$

傅里叶光谱仪测量标准腔型黑体^[14-15] $S(B_k, \lambda)$, 可通过公式 (10) 计算:

$$S(B_k, \lambda) = K(\lambda)L(B_k, \lambda) + S_{Bg}(\lambda) \quad (10)$$

式中: $K(\lambda)$ 为被测仪器的绝对辐亮度响应度; $S_{Bg}(\lambda)$ 为傅里叶光谱仪测量的背景信号, 通过测量真空定标仓的内壁辐射获得。定标时, 真空定标仓内壁的发射率为 0.92, 工作温度为 $(153 \pm 0.2) \text{ K}$ 。

$$L_{IS}(\lambda) = [S(IS, \lambda) - S_{Bg}(\lambda)] / K(\lambda) \quad (11)$$

在常温常压和真空低温条件下, 开展了红外积分球辐射源光谱辐亮度定标, 定标结果如图 12 所示, 实现了光谱辐亮度输出等色温近线性可调功能。红外积分球辐射源真空条件下, 驱动 4 只碳纤维石英电热管, 工作电流为 3.5 A, 在波长为 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 处的辐亮度可调范围分别达到 6.4 和 $0.8 \mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$ 。红外积分球辐射源内置 8 组碳纤维石英电热管, 理论上可实现 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的辐亮度可调范围达到 12.8 和 $1.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$ 。红外积分球辐射源 $10 \mu\text{m}$ 辐亮度可调范围相当于 330 K 和 0 K 理想黑体输出辐亮度之差。实际上碳纤维石英电热管最大工作电流为 5 A, 因此红外积分球辐射源光谱辐亮度输出仍有一定的提升空间。

根据公式 (5), 红外积分球辐射源的碳纤维石英电热管总电功率由 4000 W 增加至 6400 W, 在积分球镀金涂层的反射率不变的情况下, 可将最大辐亮度动态范围提升 1.6 倍。辐亮度动态范围由 $0.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$ 提升至 $1.6 \mu\text{W}/(\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm})$ 。根据图 4 的分析,

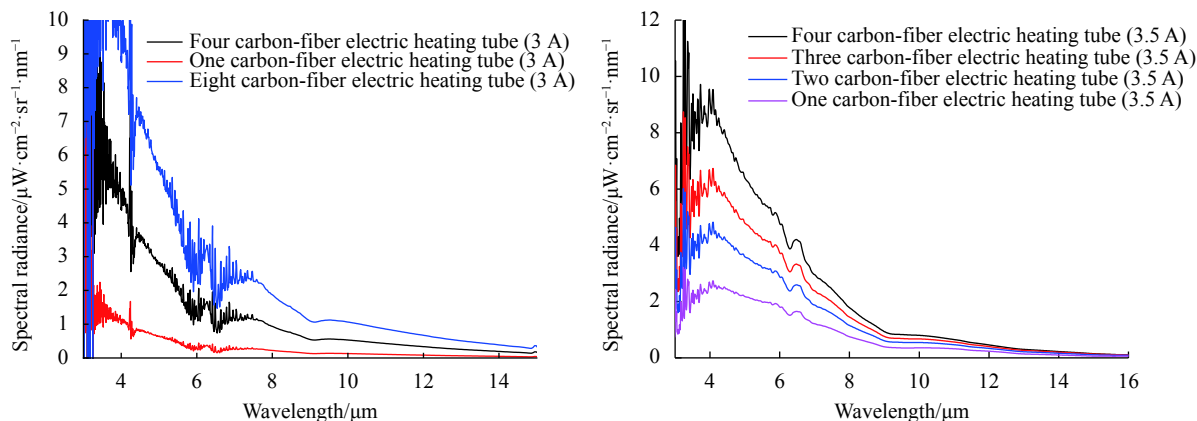


图 12 常温常压和真空低温条件下红外积分球辐射源光谱辐亮度定标结果

Fig.12 Spectral radiance calibration results of infrared integrating sphere emitters at room temperature, atmospheric pressure, low temperature and vacuum environment

反推涂层反射率提升高于 3%。

由图 12 可知, 红外积分球辐射源输出的光谱辐亮度输出受水汽、CO₂ 等气体的吸收和发射影响得到显著改善; 红外积分球辐射源光谱辐亮度具有等色温近线性输出特点。波长小于 5 μm 的毛刺是因为傅里叶光谱仪测量信噪比较小。傅里叶光谱仪配置了制冷 MCT 和 InSb 探测器, 此次测量采用制冷型 MCT 探测器, 测量 300 K 标准腔型黑体光谱范围 3~15 μm 的信噪比, 测量结果如图 13 所示。

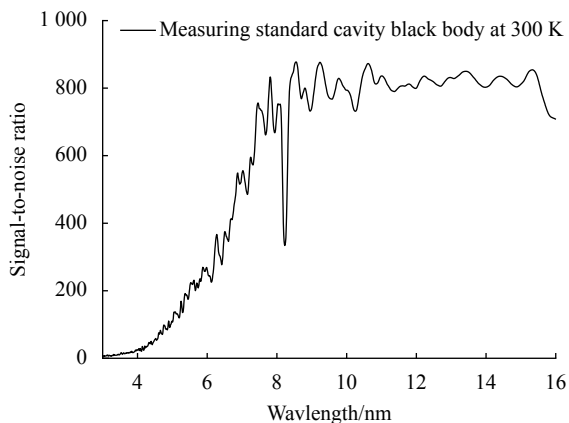


图 13 傅里叶光谱仪测量 300 K 标准腔型黑体的信噪比结果

Fig.13 Measurement of SNR of 300 K standard cavity blackbody by Fourier spectrometer

4 结束语

针对红外遥感器的 NESR 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改进优化设计和研制工艺流程: 采用铜焊焊接材料, 红外积分球辐射源可在 153~300 K 环境工作; 增加碳纤维石英电热管辐射功率, 优化了镀金工艺, 提升了辐亮度输出动态范围和角度均匀性。

第二版红外积分球辐射源具有高均匀性、高稳定性、宽动态范围调节、低背景辐射等多方面的技术优点, 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: (1) 结合高精度的热红外标准辐亮度计, 进一步提升宽动态范围红外积分球辐射源的辐射定标精度; (2) 利用优化设计的宽动态范围红外积分球辐射源, 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] Lu Wanzhen, Yuan Hongfu, Xu Guangtong. Modern Near Infrared Spectroscopy [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 37-45. (in Chinese)
- [2] Rentz J H, Engel J R. Passive spectro-radiometer calibration: Radiance responsivity, sensitivity, and radiation reference[C]// Proceedings Fourier Transform Spectroscopy: New Methods and Applications, 1999: FWE13.
- [3] Li Jianhua, Xue Feng, Xue Lian, et al. Key parameter test of infrared Fourier transform imaging spectrometer [C]//Proceedings of 2015 Optical Precision Engineering Forum, 2015: 201-207. (in Chinese)
- [4] Li J H, Xue F, Xue L, et al. Performance test of Fourier transform infrared imaging spectrometer [J]. *Optics and*

- Precision Engineering*, 2015, 23(10): 201-207. (in Chinese)
- [5] Zhang Mengya, Yuan Yinlin, Zhai Wenchao, et al. Design and detection of infrared integrating sphere radiation source with wide dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0612006. (in Chinese)
- [6] 锡(金属元素)百度百科. <https://baike.baidu.com/item/%E9%94%A1/11196?fr=aladdin>.
- [7] Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, et al. Study on the uniformity of large aperture integrating sphere reference light source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0422003. (in Chinese)
- [8] Gao Kuiming, Xie Zhi. Theory and technology of infrared radiation temperature measurement [M]. Shenyang: Northeast Institute of Technology Press, 1989. (in Chinese)
- [9] Labsphere Inc. A guide to integrating sphere theory and applications [EB/OL]. 2013-04-22. <http://www.labsphere.com.cn/uploads/technical-guides/a-guide-to-integrating-sphere-theory-and-applications.pdf>.
- [10] Xie Ping, Wu Haoyu, Zheng Xiaobing, et al. Automatic test system for directional radiation characteristics of large aperture integrating sphere [J]. *Optical Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1943-1950. (in Chinese)
- [11] Hao Xiaopeng, Song Jian, Sun Jianping, et al. National measurement standard device for infrared remote sensing brightness temperature of Fengyun satellite [J]. *Optical Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1845-1851. (in Chinese)
- [12] Shu Xin, Hao Xiaopeng, Song Jian, et al. Development of 100 ~ 400 K vacuum infrared bright temperature standard blackbody radiation source [J]. *Journal of Metrology*, 2019, 40(1): 15-21. (in Chinese)
- [13] Shu Xin. Development of 100~400 K vacuum infrared bright temperature standard blackbody radiation source [D]. Hangzhou: China University of Metrology, 2018: 5- 15. (in Chinese)
- [14] Xu Jun, Meng Binghuan, Zhai Wenchao, et al. Calibration of common temperature blackbody based on thermal-infrared standard radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 716-721. (in Chinese)
- [15] Xu Jun, Meng Binghuan, Zheng Xiaobing, et al. Development and calibration of infrared standard radiometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 863-868. (in Chinese)