

大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测

袁银麟 徐 骏 翟文超 戚 涛 邹 鹏 吴浩宇 郑小兵

(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)

摘要 为了实现大口径、宽视场光学遥感器的辐射定标, 研制了新型的直径 3 m、出光口直径 1 m 的可变光谱积分球光源。采用多种波长的发光二极管密集阵列发光单元, 结合卤钨灯发光单元, 在 400~2500 nm 波段实现了绝对辐亮度和光谱分布的动态可调, 开发了光谱自动匹配算法, 能够模拟阳光、海水、植被、沙漠等典型目标光谱。参考光源采用循环水冷温控和高精度可编程直流电源驱动技术, 保障了光源的稳定性。检测结果表明: 光源角度均匀性在 $\pm 60^\circ$ 以内优于 99.4%, 面均匀性优于 99.5%, 2 h 内稳定性优于 99.8%。

关键词 测量; 积分球; 参考光源; 光谱匹配; 辐射定标

中图分类号 O433; TN312.8 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0712004

Design and Test of a Spectrally Tunable Integrating Sphere Reference Light Source with Large Exit Aperture

Yuan Yinlin Xu Jun Zhai Wenchao Qi Tao Zou Peng Wu Haoyu Zheng Xiaobing

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract To meet the radiometric calibration requirements of optical remote sensor with large aperture and wide viewing field, a spectrally tunable reference light source with 3-m diameter integrating sphere and 1-m diameter exit port is designed. By incorporating multi-wavelength light-emitting diode (LED) modules and tungsten-halogen lamps modules, both absolute radiance and spectral distribution of the light source can be adjustable within 400~2500 nm. A spectral auto-match algorithm is developed to generate solar, ocean, vegetation, desert and other typical target spectrum. LED modules are cooled by water circulating system with high temperature stability and driven by high precision programmable direct current power supplies, which ensures the stability of exit radiation. The test results show that the planar uniformity of the source is better than 99.5% at the exit port, the angular uniformity is better than 99.4% within $\pm 60^\circ$ to the exit normal, and the stability of source is better than 99.8% within 2 hours.

Key words measurement; integrating spheres; reference light source; spectral matching; radiometric calibration

OCIS codes 010.5630; 120.3150; 280.4788; 300.6170; 330.1730

1 引 言

实验室辐射定标是光学传感器工程研制和性能评估的重要环节之一, 其目的是确定光学遥感仪器最终信号输出与已知入射辐射量基准之间的定量关系, 确定光学遥感仪器响应动态范围, 检测光学遥感仪器信号响应线性以及稳定性等性能参数。光学

传感器实验室辐射定标应满足全光路、全孔径、全视场、全动态范围等要求。定标大口径宽视场光学遥感器时应尽可能模拟实际工作状态, 采用与其观测谱段和动态范围匹配的参考光源^[1-7]。

大口径宽视场遥感仪器的实验室辐射定标, 一般采用大出光口的积分球光源。它是一种较为理想

收稿日期: 2013-01-23; 收到修改稿日期: 2013-03-22

基金项目: 国家 863 计划(2008A121203, 2012AA1212A302-2)

作者简介: 袁银麟(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事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等方面的研究。E-mail: ylyuan@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事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等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

的均匀漫射参考光源,光谱辐射调节动态范围宽,辐亮度输出的面均匀性和角度均匀性优良,具有长时间稳定性。

传统卤钨灯积分球参考光源的工作色温约为 2850 K,远低于太阳 5800 K 的色温,特别是紫外到蓝光波段与太阳光谱差异显著,限制了太阳反射波段光学遥感器的辐射定标动态范围。近年来,为了提高实验室辐射定标的精度,降低定标光源与目标之间光谱非匹配引起的不确定度,开展模拟真实目标光谱辐射条件下的系统级定标成为新的技术要求。卤钨灯积分球光源一般仅具有单一和固定的光谱辐射分布,调节其驱动电流将同时改变辐射量值和光谱分布,因此不适于作为光谱匹配的参考光源。

为了提高太阳反射波段的参考光源与预期观测景物的光谱匹配和动态范围匹配效果,发展可调光谱参考光源技术是近年来辐射定标领域的一项新研究内容。美国标准与技术研究所(NIST)研制了一种以发光二极管(LED)为发光介质的光谱可调光源(STS),可以模拟从可见光到近红外不同光源的光谱

分布,作为光谱辐射、光度和色度计量参考光源^[8]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制了一种由氙灯和 LEDs 作为光源的积分球太阳光谱模拟器,太阳光谱的匹配平均相对误差优于 5.67%,出射面非均匀性优于 2%,非稳定性优于 $\pm 3\%$ ^[9]。

本文介绍了一种以卤钨灯和 LED 发光单元为发光介质的大孔径可调光谱积分球参考光源,详细论述了光源的光机设计、温控设计、发光单元设计、驱动设计和输出辐亮度动态调节的设计研制方案。实测结果表明,该参考光源具有优良的角度均匀性、面均匀性和稳定性,可应用于大孔径光学遥感器的系统级辐射定标和性能检测。

2 大孔径可调光谱积分球参考光源研制

2.1 总体设计

大孔径可调光谱积分球参考光源系统的结构组成如图 1 所示,系统主要包括主控电脑、驱动电源、循环水冷精密温控系统、监测光谱仪,以及光谱调谐和辐射动态范围调节软硬件设备。

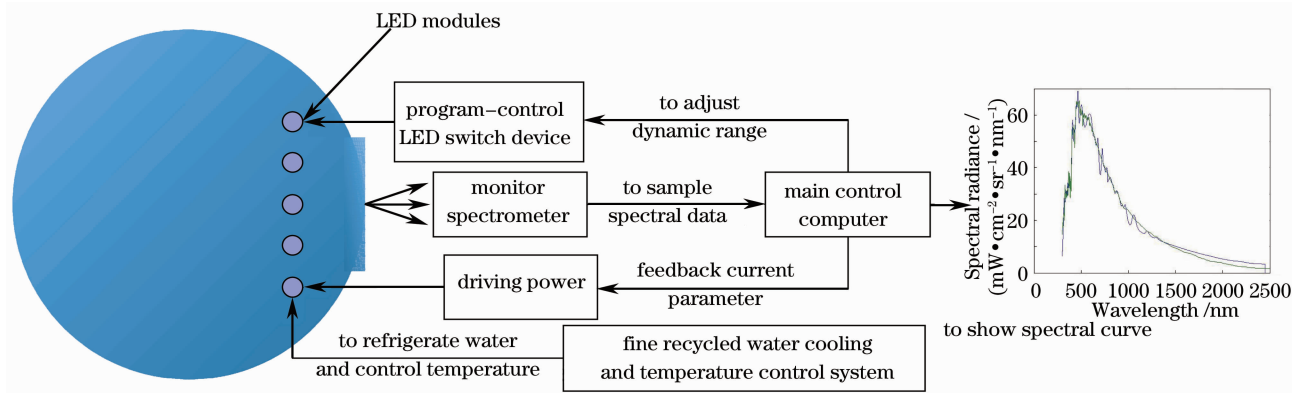


图 1 大孔径可调光谱积分球参考光源系统构成图

Fig. 1 System configuration of spectrally tunable reference light sources with large aperture

在大孔径可调光谱积分球参考光源使用前,使用监测光谱仪对积分球出射光的绝对光谱辐射亮度和相对光谱分布进行精确测量,主控电脑比较实际光谱分布和预设的目标光谱分布,通过光谱仿真算法计算每种 LED 及溴钨灯的电流调节系数,并通过光谱调谐和辐射动态范围调节软件,发送调节指令给 LED 电源和卤钨灯电源和程控开关设备,通过逐步逼近的调节,实现预设的目标光谱和辐射分布。

2.2 积分球设计

积分球设计的基本要求,是利用有限数量和功率的发光单元产生尽可能大动态范围的辐射输出,并保证出射光的角度和平面均匀性。积分球出射的辐亮度可以由空腔的辐射传递理论推导得到,即^[10]

$$L_s = \frac{\Phi}{\pi A_s} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} = \frac{\Phi}{\pi A_s} \cdot M, \quad (1)$$

式中: L_s 为积分球输出光谱辐亮度; Φ 为发光单元的总发光通量; A_s 为积分球内表总面积; ρ 为内壁涂层反射率; 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 为多次反射比因子。

根据(1)式,为了提高输出光谱辐亮度 L_s ,应当采用反射率 ρ 高的内壁涂层,减小开口比 f 。这里选择聚四氟乙烯作为积分球内壁涂层,其反射率在 400~2500 nm 波段内高于 95%,且方向反射均匀性优良,是比较理想的漫反射体^[11]。

积分球理论和实验研究表明^[12-15],在涂层反射率一定的情况下,开口比 $f \leq 5\%$ 时,才能满足出射

光角度均匀性优于 98% 的要求。为满足大孔径遥感器的全口径定标要求,积分球出光口直径设计为 1000 mm,积分球内径为 3000 mm。为了减小开口比,应尽可能增大发光单元的发光通量,减少发光单元的安装开口数量和面积。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,每个发光单元的开口直径为 60 mm。整体核算积分球开口比约为 4%。

所有发光单元均安装在前半球(即出光口所在的半球),与积分球出光口中心法线方向成 45° ,并采用遮挡部件对一次光进行遮挡,避免直射光由球口直接出射。每种 LED 在积分球的 8 个发光区域尽可能呈空间对称安装,将 120 个发光单元平均分配到 8 块区域,每个发光区域有 15 个发光单元,分 3 排均匀安装,每排数量分别为 4、5、6 个,如图 2 所示。



图 2 发光单元在积分球上的安装位置示意图

Fig. 2 Sketch of irradiance modules location mounted on the integrating sphere

2.3 发光单元的设计

参考光源的最大辐亮度输出设计为 1 个太阳常数照射下反射率为 1 的目标反射辐亮度。通过实验测量各种类单个 LED 的光谱发光通量,估算了

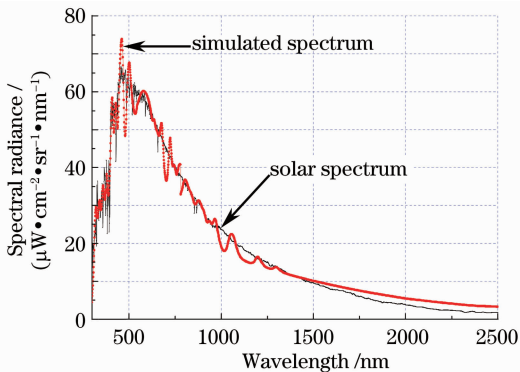


图 3 综合采用 LED 和卤钨灯发光单元的太阳光谱模拟效果

Fig. 3 Simulation of solar spectrum using LED and tungsten-halogen lamps

LED 安装在 3 m 直径积分球内的出射光谱辐亮度,并按照光谱匹配算法计算出最大辐亮度输出时不同波长的 LED 功率配置,模拟效果如图 3 所示,各波长 LED 功率配置如表 1 所示。模拟结果与目标光谱相对标准偏差小于 2%,随着 LED 的种类越来越丰富,模拟曲线将会越来越平滑,光谱相对差异将会大大缩小。添加新种类 LED 不会带来总功率的增加,仅需要将相邻波段 LED 的功率重新分配和局部优化。

表 1 LED 波长及功率配置表

Table 1 Detailed configuration of LED's peak wavelengths and power consumption

Wavelength /nm	Power consumption /W
320	150
340	133
360	141
380	141
396	70
400	70
409	133
430	233
450	116
466	1000
496	1083
504	333
518	1000
Warm white	10000
628	1100
637	1200
660	83
679	300
695	133
724	133
732	120
745	183
765	66
770	250
780	333
800	333
810	233
820	166
830	166
840	166
850	200
870	183
880	183
890	183
910	250
940	250
970	333
1050	300
1070	133
1200	83
1300	33

为了提高 LED 的发光功率密度,首选大功率 LED 面阵器件,其中 10×10 面阵器件的电功率为 300 W,结构尺寸 $\phi 56$ mm。这类 LED 器件单位面积发光通量大,封装形式也有利于发光单元集成。目前商业成熟的 300 W 面阵器件已可覆盖 385~470 nm、505~540 nm,暖白色以及 620~660 nm 波段范围。对于 300 W 器件不能覆盖的工作波段,采用了 3~5 W 的表面贴封装中小功率 LED 器件,常规尺寸为 $5.0 \text{ mm} \times 7.0 \text{ mm}$ 。中小功率 LED 器件均集成封装于 $\phi 60$ mm 单面铜基板上,每个铜基板上集成 40~80 个 LED 器件。

目前商业成熟的 LED 器件工作波段局限于 1300 nm 以内,为实现可见光到短波红外的宽波段动态调整,这里采用卤钨灯作为补充光源,用于 1300~2500 nm 的光谱辐射动态调整。卤钨灯的光谱辐射非常接近于理想的黑体辐射,调节其供电电

流可以改变色温,并进一步改变其发光光谱分布。通过调节卤钨灯点亮的数目,可以实现短波红外波段的积分球发光亮度动态调整。经与 LED 发光单元类似的发光功率核算,积分球内安装 250 W 卤钨灯 8 个。

2.4 精密温控设计

LED 发光单元消耗的电功率中,有 60%~70% 转化为热,引起 LED 晶片的节点温度升高,影响 LED 发光单元峰值波长和发光效率的稳定性。当温度升高时,半导体材料的禁带宽度将减小,导致器件发光波长变长,颜色发生红移。根据 LED 厂商和相关文献数据^[16-18],温度变化引起的 LED 发光峰值波长和发光通量的相对变化如表 2 所示^[14],LED 发光单元的波长温度系数最大为 $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,发光通量相对变化率最大为 $1\%/^\circ\text{C}$ 。

表 2 温度变化引起的 LED 发光峰值波长和发光通量的相对变化率

Table 2 Relative change rate of peak wavelength and radiation flux caused by temperature

Wavelength	Relative change rate of peak wavelength / (nm/°C)	Relative change rate of radiation flux / (%/°C)
Amber (610~620 nm)	0.06	0.5
Orange (587~592 nm)	0.1	1
Warm white (520~630 nm)	0.04	0.25
Green (520~540 nm)	0.05	<0.25
Blue (460~490 nm)	0.05	<0.25
Cyan (490~520 nm)	0.04	<0.25

使用启停式水冷机对 LED 发光单元进行温度控制,采用高精度直流恒流源驱动 LED 发光单元。图 4 为 LED 发光单元发光面中心法线方向 3 m 距离处的峰值波段辐出度测量曲线。在 60 min 测量时段内,水冷机的温度控制范围为 $(25 \pm 1.5)^\circ\text{C}$,LED 辐出度最大变化为 0.9%,根据朗伯型 LED 发光单元辐出度与发光通量之间的关系推算,发光通量的相对变化率约为

$0.3\%/^\circ\text{C}$ 。图中发光通量的规律性起伏是水冷机在温控范围内的启动-停止动作引起的。

根据 LED 发光单元峰值波长的实测温度变化率,为了将积分球的输出起伏控制在 0.2% 以内,峰值波长漂移小于 0.1 nm,LED 发光单元的温度起伏应控制在 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内。

根据总散热功率的核算,采用压缩机制冷方式进行 LED 发光单元的主动式温度控制,如图 5 所示。循环水经冷水机制冷,由 1 进 8 出分水器均匀地分配到 8 个发光区域,每个发光区域串联 15 个发光单元水冷块,回到 8 进 1 出的集水器,最后返回水冷机,形成闭环温控。

大功率 LED 铜基板背面涂抹高散热性硅脂,压装在水冷块上,如图 6 所示。LED 晶片的耗散功率最大约为 3 W,水流温度设置在 25°C ,估算 LED 节点到环境的热阻小于 $15^\circ\text{C}/\text{W}$ 。根据 LED 节点到散热管脚典型热阻值,设计了铜基 PCB 和铝材水冷块的厚度。水冷块中间加工蛇形水槽,以增加水流与金属水槽的有效接触面积,增加热交换量,满足

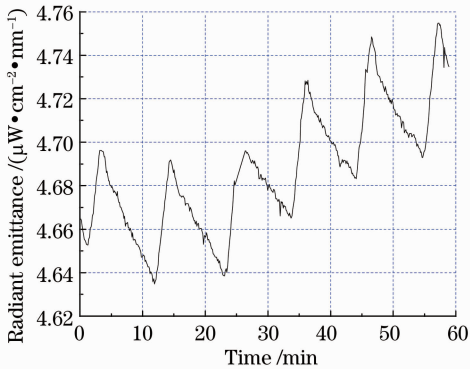


图 4 LED 辐出度的相对变化率测量

Fig. 4 Relative change rate of Measured LED radiation emittance

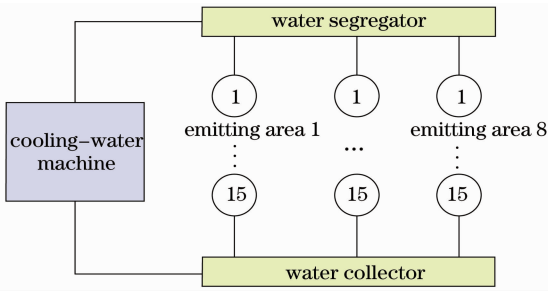


图 5 循环水冷温控系统示意图

Fig. 5 Principle diagram of fine recycled water cooling and temperature control system

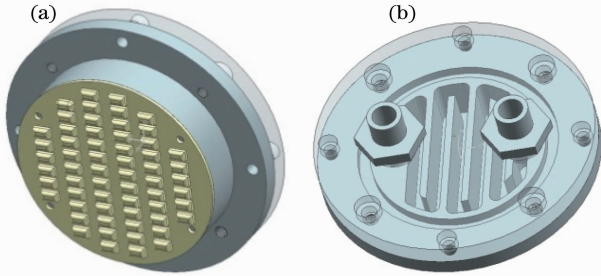


图 6 铜基板 PCB 及其与水冷块固定示意图。

(a) 发光面; (b) 水冷面

Fig. 6 Sketch of copper plate PCB and water cooler module. (a) Emitting plane; (b) water cooling plane

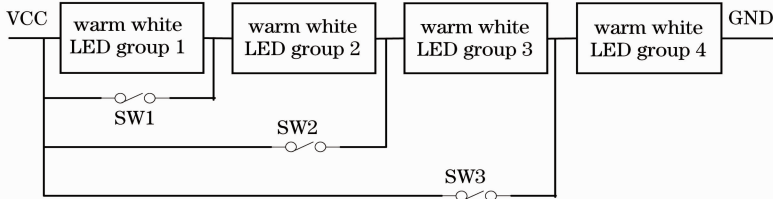


图 7 暖白色 LED 发光单元供电原理图

Fig. 7 Schematic of driving circuit of LED modules

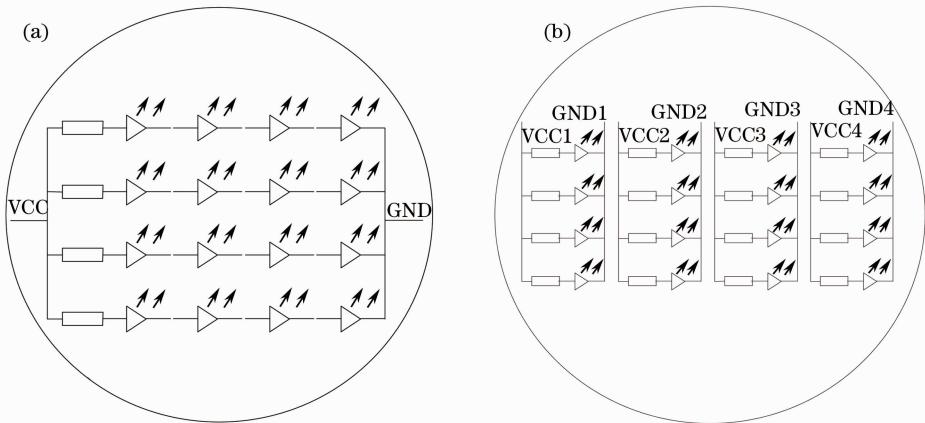


图 8 发光单元内部的混联电路原理图。(a)单元内仅一个混联电路；(b)单元内多个混联电路

Fig. 8 Schematic of mixed driving circuit of LED modules. (a) Only one mixed driving circuit in LED modules; (b) more than one mixed driving circuits in LED modules

LED 发光单元的工作要求。这种制冷方式的优点是散热效率高。水冷机的温度控制方式为比例微分积分(PID)智能温控方式。根据 QFIN 热分析软件的仿真,上述热控制设计方案可保证 LED 节点工作最高温度小于 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,实测温控精度优于 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.5 驱动设计及输出辐亮度动态调节设计

为了满足不同遥感器的定标动态范围要求,采用分档大动态范围粗调和档内精细调节的辐亮度调节设计方案。以暖白色 LED 发光单元为例,按照表 1 所示的 10 kW 总功率要求,参考光源上安装了 32 个 300 W 暖白色 LED 发光单元。将这 32 个发光单元平均分为 4 组,通过图 7 所示的 3 个切换开关(SW),实现 25%、50%、75%和 100%满量程的 4 档粗调。各组均由 8 个发光单元串联组成。在各档内通过程控电源调节驱动电流,实现档内发光功率的连续精细调节。其他波段发光单元的供电方案与图 7 类似,根据表 1 计算的总发光功率设计分组数目和每组内发光单元数目。

每个发光单元内部采用混联方式供电,如图 8(a)所示,图中 VCC 为电源电压,GND 为接地。对于表 2 中部分发光总功率较低的波段(例如小于 450 nm 的近紫外波段),可以在一个发光单元上集成多个波段 LED 的混联电路,以提高单个发光单元的功率密度,如图 8(b)所示。

LED 发光单元和卤钨灯发光单元均使用精密程控直流恒流源驱动,其发光稳定性主要取决于电源的纹波、温度稳定性及源效应。每个波段的 LED 发光单元均使用独立的精密程控直流电源,简化控制设计,提高可靠性。

为保证工作安全性,测量了所有 LED 发光单元的电流与电压阈值参数,并保存到控制软件数据库中。在驱动 LED 发光单元时,实时监测驱动电源的电压参数和电流,并将控制软件数据库中的阈值参数进行对比,超过阈值参数时报警并停止驱动。

发光单元的驱动电流设置,程控开关的档位设置均由上位机程序自动控制完成,控制软件采用 Microsoft Visual Studio 2005 设计,通过调用 VISA Functions 实现对电源操控。

3 整机性能测试

采用大口径积分球辐度分布自动测试系统^[19]和绝对光谱响应率标准探测器^[20]对积分球的整机性能特性进行了测试,测试项目包括积分球的光谱辐亮度、平面均匀性、角度均匀性和稳定性等。

3.1 光谱辐亮度

利用溯源于标准灯和漫射板系统的光谱仪,对大孔径可调光谱积分球参考光源的光谱辐亮度进行定标,结果如图 9 所示。

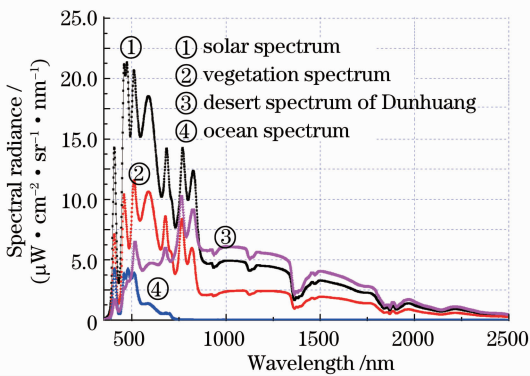


图 9 光谱辐亮度输出结果

Fig. 9 Spectral radiance output results

目前参考光源能够模拟太阳反射光源、敦煌沙漠地表光谱、海洋光谱和植被等多种遥感目标的光谱。受 LED 种类和研制成本限制,目前参考光源仅配置了 22 种波段的 LED 发光单元,受制于 660~830 nm LED 发光单元集成密度影响,模拟太阳反射光谱最大输出辐亮度为 0.3 个太阳常数。在 400~660 nm 参考光源输出已能够达到一个太阳常数。图 9 中 440、480、710 nm 波长附近的较大波谷,主要

原因是缺少对应波长的 LED。目前大功率 LED 晶片的波段已覆盖 365~940 nm,通过增加大功率 LED 晶片的种类、设计新的 LED 封装支架和提高 LED 晶片的集成密度,可进一步提高 LED 发光单元的光通量输出,光谱模拟匹配程度也会得到明显改善。

3.2 角度均匀性

参考光源的角度均匀性表征相对于其出光面法线一定角度范围内辐亮度的变化程度,通常以多个角度测量的测值相对于法线测值的相对偏差来表述。在出光面法线±60°的角度范围内,分别进行了水平平面和垂直平面内的角度均匀性测量,图 10 是检测原理示意图,水平和垂直平面内测量结果分别如图 11 和表 3 所示。图 11 中,在±45°处测量到的两个低谷,原因为探测器观测到积分球两半球处缝隙。

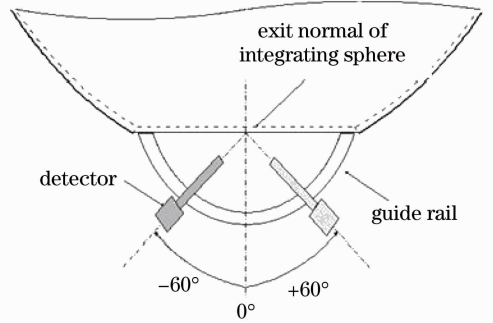


图 10 角度均匀性检测示意图

Fig. 10 Principle diagram of angular uniformity measurement

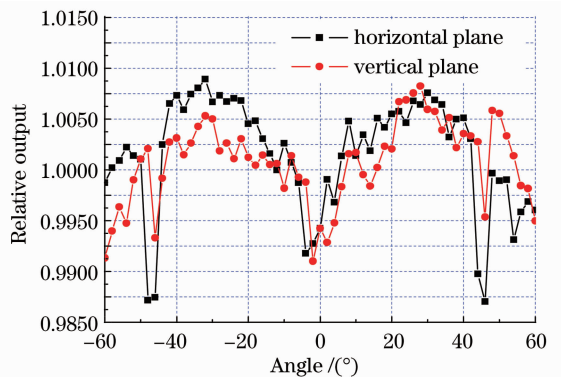


图 11 角度均匀性测量结果

Fig. 11 Results of angular uniformity

表 3 角度均匀性测量结果

Table 3 Horizontal and vertical angular uniformity

Plane	Angular uniformity
Horizontal plane / %	99.40
Vertical plane / %	99.53

3.3 面均匀性

参考光源的面均匀性表征其出光口平面内、不同位置的辐亮度的相对偏差程度。通常以多个测点的测值之间相对偏差来表述。在仅点亮卤钨灯和点亮全部发光单元情形下进行了面均匀性检测,检测区域 $1100\text{ mm}\times 1100\text{ mm}$,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,检测结果如图 12 所示和表 4 所示。在 $\phi 1000\text{ mm}$ 的区域内,面均匀性优于 89.5% ,在出光口中心 $\phi 890\text{ mm}$ 的区域内,面均匀性优于 99.5% 。测试结果表明,增加了 LED 发光单元的积分球参考光源,保持了传统卤钨灯积分球光源的优良面均匀性。

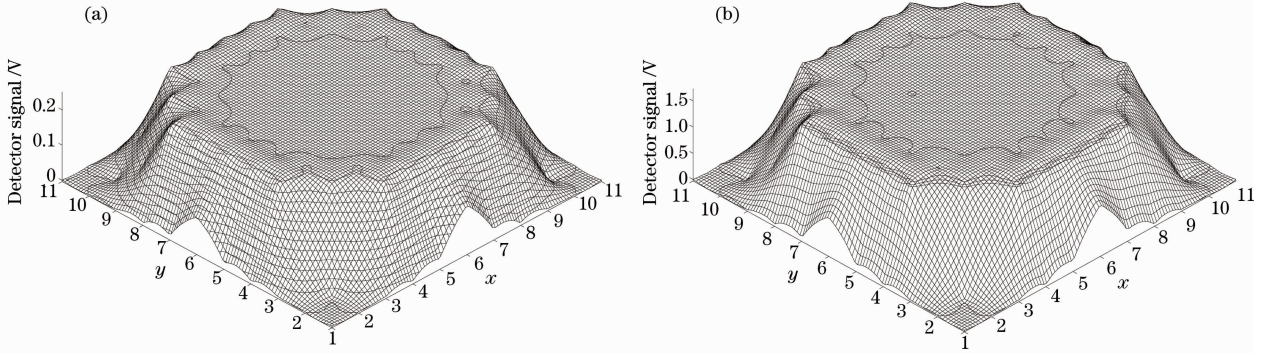


图 12 面均匀性检测结果。(a)仅点亮卤钨灯;(b)点亮全部发光单元

Fig. 12 Measurement results of planner uniformity. (a) Tungsten-halogen lamps irradiance modules; (b) all irradiance modules

表 4 参考光源的面均匀性($\phi 890\text{ mm}$)

Table 4 Planner uniformity at the exit port region of $\phi 890\text{ mm}$

Planner uniformity measurement result	Mean /V	Uniformity /%	Max /V	Min /V
Tungsten-halogen lamps	0.239	99.56	0.241	0.236
All lamps	1.649	99.59	1.659	1.627

3.4 稳定性

参考光源的稳定性是指其输出特性随时间变化的程度。参考光源开机预热完成后,使用标准探测器以 5 s 间隔持续测量 2 h ,其输出相对于均值的起伏小于 0.12% ,检测结果如图 13 所示。

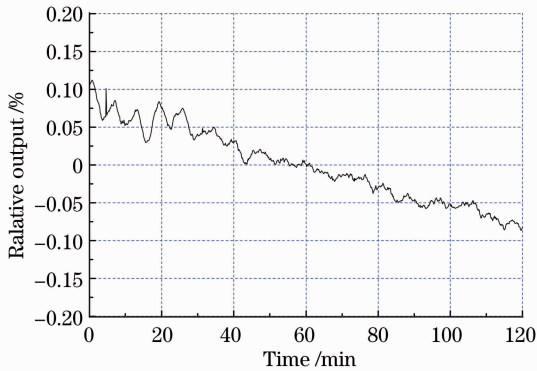


图 13 稳定性检测结果

Fig. 13 Measurement results of stability

辐射定标积分球参考光源,详细介绍了参考光源的设计以及性能检测。

采用不同峰值波长 LED 发光单元和卤钨灯作为发光介质,实现了参考光源的光谱可调。参考光源采用精密温控和驱动设计,具有良好的稳定性。测试表明参考光源在 $\pm 60^\circ$ 的大角度范围内角度均匀性优于 99.4% ,在出光口中心 $\phi 890\text{ mm}$ 的区域内,面均匀性优于 99.5% 。

在进一步的工作中,将提高 $660\sim 830\text{ nm}$ LED 发光单元集成密度,使参考光源的最大辐亮度达到 1 个太阳常数照射下反射率为 1 的目标反射辐亮度。通过增加更多波长的 LED 发光单元,可以提高输出光谱匹配度。可调光谱参考光源与传统卤钨灯积分球光源相比,具有短波增强以及光谱匹配方面的优势,与氙灯积分球参考光源相比,具有更高的稳定性,在大口径、宽视场遥感器的光谱辐射定标方面具有良好的应用前景。

4 结 论

根据大口径、宽视场遥感器的系统级定标需求,设计了直径为 3 m ,开口直径为 1 m 的可调光谱的

参 考 文 献

- 1 Chen Feng, Zheng Xiaobing. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008,16(3): 415-419.

- 陈 风, 郑小兵. 光谱非匹配对于光学遥感器定标精度影响的分析[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(3): 415—419.
- 2 Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, 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.
- 3 Jin Zhonghai, Xun Yulong, Zhang Liming, et al.. Integrating sphere radiation calibration system for UV to near IR[J]. Acta Optica Sinica, 1989, 9(6): 556—561.
金中海, 荀毓龙, 章立民, 等. 紫外至近红外积分球辐射定标系统[J]. 光学学报, 1989, 9(6): 556—561.
- 4 Yang Xiaohu, Wang Shurong, Qu Yi, et al.. Research of UV spectral radiance characteristics of the integrating sphere based on calibration by the absolute radiance radiometer[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1008007.
杨小虎, 王淑荣, 曲 艺, 等. 基于绝对辐亮度计定标的积分球紫外光谱辐射特性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008007.
- 5 Zhang Chunlei, Xiang Yang. Accuracy analysis of imaging spectrometer radiometric calibration using standard detector-diffuser method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 061101.
张春雷, 向 阳. 成像光谱仪标准探测器-漫反射板定标法准确性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 061101.
- 6 Zheng Xiaobing. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 32(5): 36—43.
郑小兵. 高精度卫星光学遥感器辐射定标技术 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 36—43.
- 7 Zheng Xiaobing, Yuan Yinlin, Xu Qiuyun, et al.. New reference sources for radiometric calibration[J]. J Appl Opt, 2012, 33(1): 101—107.
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.
- 8 F Iren, S W Brown, G P Eppeldauer, et al.. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications [J]. Opt Eng, 2005, 44(11): 363—371.
- 9 Liu Hongxing, Sun Jingxu, Liu Zexun, et al.. Design for intergrating 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.
- 10 J A Jacquez, H F Kuppenheim. Theory of the integrating Sphere [J]. J Opt Soc Am, 1955, 45(6): 460—470.
- 11 Yang Benyong, Zhang Liming, Shen Zhengguo, et al.. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1851—1858.
杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(8): 1851—1858.
- 12 Labsphere. A Guide to Integrating Sphere Theory and Applications [OL]. <http://www.labsphere.com/technical/technical-guides.aspx>, [2013-04-22].
- 13 V Sandgren. Characterization of an Integrating Sphere Radiation Reference Source[R]. Göteborg; No. EX084/2011, 2011.
- 14 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.
- 15 Y He, P Li, G Feng, et al.. Computer modeling of a large-area integrating sphere uniform radiation source for calibration of satellite remote sensors[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2011, 122(13): 1143—1145.
- 16 Philips. LUXEON Rebel and LUXEON Rebel ES Color Portfolio [OL]. <http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-rebel/luxeon-rebel-color#datasheets>, [2013-04-22].
- 17 Ding Tianping, Guo Weiling, Cui Bifeng, et al.. The effect of temperature on the PL spectra of high power LED [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1450—1453.
丁天平, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 温度对功率LED光谱特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1450—1453.
- 18 Liu Yuyuan, Luo Yi, Han Yanjun, et al.. Effect of LED wavelength consistency and temperature uniformity on color difference of LCD backlight[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(1): 1001—1004.
刘煜原, 罗 毅, 韩彦军, 等. LED波长一致性和温度均匀性对背光源色差的影响[J]. 半导体光电, 2010, 31(1): 1001—1004.
- 19 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. 大口径积分球辐照度分布自动测试系统[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 1943—1950.
- 20 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, 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, 2001, 21(6): 749—752.

栏目编辑: 何卓铭