

双氙灯光源积分球日照计校准系统

崇伟^{1,2}, 吕文华^{1,2*}, 张健^{1,3,4}, 梁婧¹, 杨晓彤¹, 刘石^{1,3,4}, 张玉^{1,3,4}, 杨科三⁵¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;² 中国气象局气象探测中心, 北京 100081;³ 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;⁴ 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;⁵ 航天新气象科技有限公司, 江苏 无锡 214127

摘要 为解决旋转热释电日照计(RPSDR)室外校准易受环境影响、重复性差、效率低等问题,提出了一种以双氙灯光源积分球系统校准 RPSDR 的室内校准方法。根据 RPSDR 的组成、结构和测量原理,利用太阳模拟、积分球环境模拟等技术,设计了以氙灯太阳模拟器输出直接辐射、以穹顶氙灯模拟散射辐射的双光源积分球日照计校准系统,提出了积分球结构参数,分析了氙灯光源的辐照度分布和光谱修正,建立了在室内进行日照阈值校准、在室外进行日照时数验证的综合性 RPSDR 校准方法。经测试,校准系统的有效辐照面内的辐照度均匀性含中心点时为 2.5%,不含中心点时为 1.6%,有效辐照面内每小时的阈值点辐照度稳定性为 0.68%,光源匹配 AM1.5 A 级太阳光谱能量分布;对一台 RPSDR 进行室内阈值校准和室外日照时数比对实验,结果验证了经系统校准后的 RPSDR 测量的日照时数与直接辐射表测量的日照时数参考值的相对误差不超过 1%,绝对误差不超过 0.26 h,满足气象行业日照时数的观测要求。

关键词 测量; 旋转热释电日照计; 双氙灯光源; 积分球; 日照阈值; 室内校准

中图分类号 TH765; P414.5+2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0112004

Calibration System of Sunshine Duration Recorder Based on Bi-Xenon Lamp Source Integrating Sphere

Chong Wei^{1,2}, Lü Wenhua^{1,2*}, Zhang Jian^{1,3,4}, Liang Jing¹, Yang Xiaotong¹, Liu Shi^{1,3,4}, Zhang Guoyu^{1,3,4}, Yang Kesan⁵¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;² Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;³ Key Laboratory of Opto-Electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China;⁴ Jilin Engineering Research Center of Photoelectronic Measurement & Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China;⁵ Aerospace Newsky Technology Co. Ltd., Wuxi, Jiangsu 214127, China

Abstract Given the environmental influence, poor repeatability, and low efficiency of the outdoor calibration of the rotating pyroelectric sunshine duration recorder (RPSDR), an indoor calibration method using RPSDR with a system of the bi-xenon lamp source integrating sphere was proposed. According to the composition, structure, and measurement principle of the RPSDR, a calibration system based on the bi-xenon lamp source integrating sphere

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-07-08; 录用日期: 2021-07-13

基金项目: 吉林省科技发展计划(20190302124GX)、长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2018-02)

通信作者: *lwhaoc@cma.cn

with the xenon lamp solar simulator outputting direct radiation and the dome xenon lamps simulating diffuse radiation was designed by technologies such as solar simulation and environmental simulation with the integrating sphere. The structural parameters of the integrating sphere were put forward, and the irradiance distribution and spectral correction of the xenon lamp source were analyzed. A comprehensive RPSDR calibration method for indoor sunshine threshold calibration and outdoor sunshine duration verification was established. According to the tests, the irradiance uniformity on the effective irradiation surface of the calibration system was 2.5% with the center point and 1.6% without the center point. On the effective irradiation surface, the irradiance stability per hour at the threshold point was 0.68%, and the light source matched with the AM1.5 class A solar spectral energy distribution. Experiments of indoor threshold calibration and outdoor sunshine duration comparison were carried out on an RPSDR. The results show that the relative error of sunshine duration measured with the RPSDR after calibration is less than 1% and the absolute error is no more than 0.26 h compared with the reference values measured with the pyrheliometer, which meet the requirements of the meteorological industry for sunshine duration observation.

Key words measurement; rotating pyroelectric sunshine duration recorder; bi-xenon lamp source; integrating sphere; sunshine threshold; indoor calibration

1 引言

根据世界气象组织气象观测仪器和观测方法指南(WMO-No. 8)的定义,日照时数是在给定时段内太阳直接辐照度达到或超过 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的各段时间的总和^[1],其中 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 为日照阈值,日照时数测量仪器通过测量直接辐照度,并通过判断其是否达到日照阈值来实现日照时数的测量^[2]。目前,常用的日照时数测量仪器有直接辐射表^[3-4]、暗筒式日照计、聚焦式日照计、双金属片式日照计、光电式数字日照计和旋转热释电日照计等^[5-6],直接辐射表则是世界气象组织推荐的日照计量标准器。在工作级测量仪器中,旋转热释电日照计(RPSDR)由于性能稳定、自动化程度高,特别是其热释电感应器的光谱响应范围介于 $300 \sim 2500 \text{ nm}$,与太阳光谱主能量带高度一致,因此 RPSDR 被广泛应用于气象、科研、生态环境和农林业等观测领域。开展 RPSDR 的校准方法研究,获取准确可靠的日照时数测量数据,不仅对研究气候变化和预报天气具有重要作用,而且直接影响太阳能资源开发、农作物生长和人类日常生活,具有重要意义。

对于日照计的校准,目前尚没有统一的、广泛认可的方法。WMO-No. 8 建议,日照计校准可以通过室外或室内两种校准方式来实现。室外校准以太阳光作为光源,被校日照计与作为日照标准器的直接辐射表开展同步测量和校准,将直接辐射表安装在自动太阳跟踪器上,以连续测量直接辐射,被校日照计与之同步开展直接辐射和日照时数测量,该方法适用于室外环境下的阈值和日照时数校准,例如 Möllenkamp 等^[7]利用瑞士 Rapperswil 地区 2013—2017 年直接辐射表和日照计同步观测数据,

研究了基于直接辐射表测量的直接辐射修正日照计所测直接辐射的线性和二次方程,日照计测量均方根误差从 11.5% 分别下降到 8.9% 和 6.9%,可见这种方法是有效的。但是这种校准方法耗时长、效率低,不利于大量日照计的批量校准工作。室内校准的关键技术在于人工模拟太阳直接辐射和散射辐射环境,目前该技术通常利用积分球和人工光源等方法来实现。徐秋云等^[8-10]利用积分球和激光光源方法在实验室环境下获得了太阳辐射计直射和散射通道定标系数;Kim 等^[11]利用积分球和卤素灯建立了太阳总辐射表的室内校准系统,获得了太阳总辐射表灵敏度。上述方法的不足在于:校准系统光源的光谱范围无法覆盖 $300 \sim 2500 \text{ nm}$ 的太阳主能量光谱区间。为了弥补这一不足,研究人员进行了很多相关研究。刘洪兴等^[12]利用积分球、氙灯和发光二极管建立了太阳光谱模拟器;杨林华等^[13]利用积分球、氙灯和溴钨灯建立了太阳辐照模拟源,利用光谱校正技术使光源光谱在一定程度上贴近了太阳光谱,该技术在星载辐射观测设备的定标上得以应用。针对地面日照时数测量,杨俊杰等^[14]利用氙灯太阳模拟器和积分球等设计了一种光电式日照计室内定标系统,建立了基于室内定标系统的日照时数校准链,实现 4 h 内日照时数模拟误差达到 3.75%;但由于日照计是通过判断直接辐射是否达到日照阈值来实现日照时数测量的,因此该方法所校准的日照时数并非日照计的可校准量,即当发现日照时数超差时,需要通过调整日照阈值实现日照计的校准,而无法通过调整日照时数使日照计变得更准确。

本文在前人研究成果的基础上,分析了 RPSDR 的结构和测量原理,重点设计了一种基于双氙灯光源积分球的日照计校准系统。研究太阳模拟器,将

其氙灯光源准直导入积分球,在积分球穹顶设置另一组氙灯,配以挡板设计,借助积分球球心太阳视运动运转机构及特殊设计的消光装置,营造一个均匀、稳定、贴近太阳光谱的多维直射与散射照度场,室内以标准 RPSDR 作为日照阈值传递标准,利用替代法实现 RPSDR 日照阈值误差的校准,室外以直接辐射表为参考标准开展日照时数比对测试,建立起在室内进行日照阈值校准、在室外进行日照时数验证的综合性 RPSDR 校准方法。该方法有效解决了 RPSDR 在室外进行阈值和日照时数校准时易受环境影响、重复性差、效率低等问题。

2 RPSDR 结构与原理

根据日照时数的定义,RPSDR 实际测量的是太阳直接辐射,通过所测直接辐射值与日照阈值相比较,判断和测量日照时数。RPSDR 的典型结构如图 1 所示,它由传感器部件和电路系统两部分组成,传感器部件由热释电感应器和旋转反光镜组成,电路系统由电机、电机驱动、信号处理电路和控制电路等组成。

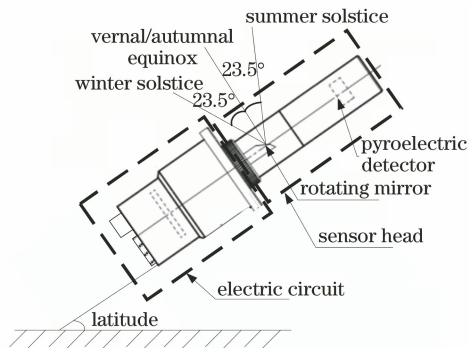


图 1 旋转热释电日照计的典型结构

Fig. 1 Typical structure of rotating pyroelectric sunshine duration recorder

将热释电感应器置于传感器部件的前段,金属罩可遮蔽阳光,用于探测由旋转反光镜发射到其上的太阳直接辐射^[15];旋转反光镜与电机相连,由电机驱动电路控制,按固定的周期旋转;将 RPSDR 按照纬度倾斜安装,能够保证旋转反光镜一年四季都可以将太阳光线反射到遮光筒内的热释电感应器上;热释电感应器接收到太阳直接辐射后,输出与电机旋转周期相同的电压信号,信号处理电路对电压信号进行采集处理,设置阈值电压和灵敏度,计算直接辐照度。当所测直接辐射大于等于日照阈值 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,则判断该旋转周期对应的时间为有日照时间,并进行累计测量;反之,则为无日照时间。

因此,解决 RPSDR 校准问题的关键在于营造一个稳定、可控、可检测的太阳直接辐射与散射辐射环境,建立针对日照阈值可复现的校准链条。

3 校准系统设计

3.1 结构设计

校准系统由积分球、太阳模拟器、氙灯组及挡板、光陷阱、供电机箱和支撑机构等组成,结构如图 2 所示。积分球采用空腔正球体设计,整体呈对半打开模式,其中一个半球固定不动,其正圆心与太阳模拟器准直系统对齐;另一个半球可沿地面滑轨打开,用于开合积分球系统;积分球内设计程控多维机械工作台,用于安装被校 RPSDR。积分球内壁涂层采用聚四氟乙烯涂料,相较于氧化镁和硫酸钡涂层,它具有红外谱段发射率高且不易脱落等优点,能够有效合成太阳光谱并将其均匀化。

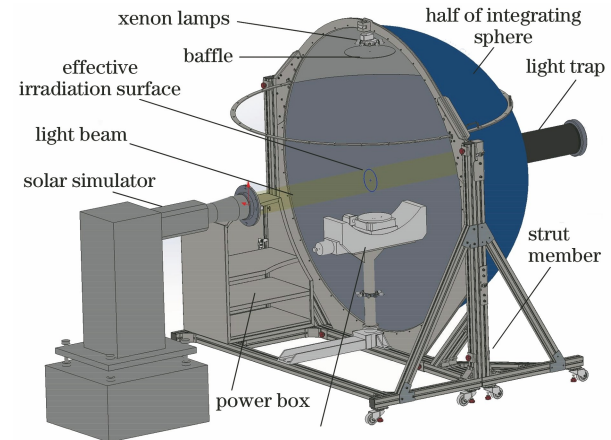


图 2 RPSDR 的双氙灯光源积分球校准系统结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of bi-xenon lamp source integrating sphere calibration system of RPSDR

根据太阳赤纬和时角变化设计积分球内多维机械工作台,当被校 RPSDR 安装在工作台上,其热释电感应器正好位于积分球球心处,通过程控系统调节工作台转动:一方面可使被校 RPSDR 绕球心做 $\pm 25^\circ$ 运转,以模拟太阳赤纬角变化;另一方面可使被校 RPSDR 绕轴线做 180° 回转,以模拟太阳方位角变化。

积分球光源采用双氙灯设计,其中太阳模拟器以氙灯作为光源,光由准直系统导入积分球,以模拟太阳直接辐射环境;同时,积分球穹顶设置一组氙灯,配以挡板,以模拟均匀的散射天空环境。直接辐射光源需要直接投射在被校 RPSDR 上,必然会在球壁上留下直接照明的光斑和被校 RPSDR 的阴影,在测试过程中,此光斑和阴影的大小和形状还将

随着机械工作台的运转而发生变化,这给测量带来不可预知的误差,因此,在直接辐射光源的对向设置足够大尺寸的光陷阱,以消除光斑和阴影的影响。

积分球的直径设计对球内能量和光谱分布都有影响,考虑到被校 RPSDR 尺寸比较大,将直接辐射光源光斑直径设计为 160 mm,将与之匹配的光陷阱直径设计为 200 mm。同时,为减小直接辐射光源通过被校 RPSDR 表面时被反射对散射背景均匀性的不利影响,将积分球直径设计为 2000 mm,以确保积分球作为一个均匀、稳定的天空背景。

3.2 辐照度分布设计

实际天空背景下直接辐射和散射辐射的能量分布比例并不固定,造成室外校准时阈值测量难以复现。为此,需设计一个稳定输出的 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 直接辐照度作为日照阈值参考值,同时需设计固定的散射辐照度作为稳定的环境辐射背景。本文所设计的积分球内壁散射辐照度分为三档,160 mm 口径的有效辐照面内直接辐照度在 $50 \sim 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 内可调,阈值点辐照度均匀性达到 3%、每小时稳定性达到 1%。经综合分析得出,系统的辐照度设计分为球心直接辐照度设计和内壁散射辐照度设计两个部分,球心直接辐照度设计通过对太阳模拟器的光学设计实现,内壁散射辐照度设计通过综合太阳模拟器和穹顶散射氙灯组设计实现。

3.2.1 太阳模拟器的辐照度设计

太阳模拟器的总体结构如图 3 所示,该结构具有轴对称性,接近太阳光谱的短弧氙灯光源位于椭球面聚光镜第一焦点处,其发出的光束会聚到椭球面聚光镜第二焦点处,在光学积分器的入射端面场镜组形成一个辐照度分布,该分布被光学积分器各通道对称分割,叠加成像后通过视场光阑和准直镜

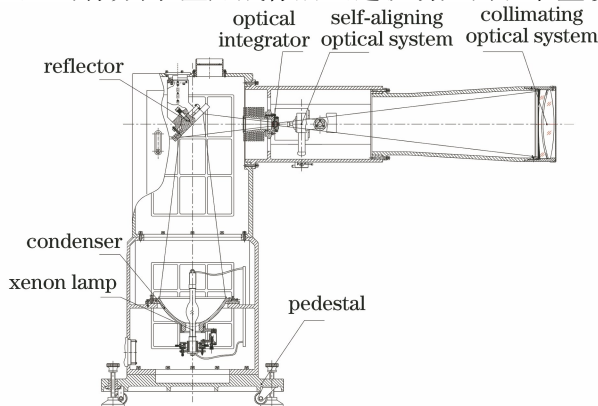


图 3 太阳模拟器的总体结构图

Fig. 3 General structure diagram of solar simulator

后以平行光射出,在球心形成一个辐照度均匀分布的有效辐照面^[16]。

考虑到太阳模拟器光学系统的像差、光源相对椭球面焦点的离焦、光源以及光学元件的制造误差等因素都会影响直接辐照度,因而只能对太阳模拟器的出射辐照度进行估算。根据氙灯辐射能量在光学系统传递过程中存在的各种损失情况,氙灯总利用率 η_g 可表示为

$$\eta_g = \eta_{\text{sg}} \times \eta_{\text{co}} \times \eta_{\text{cr}} \times \eta_{\text{pr}} \times \eta_{\text{it}} \times \eta_{\text{ct}} \times \eta_{\text{et}} \times \eta_{\text{ft}} \times \eta_{\text{at}}, \quad (1)$$

式中: η_{sg} 为氙灯辐射通量的利用率,它由氙灯辐射强度角分布特性曲线及所选定的椭球面包容角决定,取值为 70%; η_{co} 为直接辐射光线准直角为 $\pm 1^\circ$ 时光学积分器通光口径对聚光镜会聚的辐射通量的利用率,取值为 40%; η_{cr} 为聚光镜表面的反射率,取值为 85%; η_{pr} 为平面反射镜表面的二次反射率,取值为 72.25%; η_{it} 为光学积分器(含附加镜)的透射率,取值为 70%; η_{ct} 为透镜总面数透射率,取值为 70%; η_{et} 为电功率转换为辐射功率的效率,取值为 30%; η_{ft} 为光学滤光片的透射率,取值为 60%; η_{at} 为准直镜窗口的透射率,取值为 90%。

通过计算可得,氙灯辐射能量经光学系统的传递后的总利用率 η_g 仅为 1.365%。假设氙灯功率为 P_0 ,那么经过传输到达球心有效辐照面的氙灯功率 $P_c = P_0 \cdot \eta_g$ 。考虑到有效辐照面的直径为 160 mm,则有效辐照面上的平均辐照度 E_b 为

$$E_b = \frac{P_c}{S} = \frac{P_0 \cdot \eta_g}{\pi \cdot r^2}, \quad (2)$$

式中: S 为有效辐照面的面积; r 为有效辐照面的半径, $r = 80 \text{ mm}$ 。

设计太阳模拟器的直接辐射输出范围为 $50 \sim 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,且重点保证日照阈值变化区间 $(120 \pm 24) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 内的辐照度稳定。根据(2)式,当 E_b 取最大值 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,氙灯功率 P_0 至少为 442 W,因此太阳模拟器光源选用 500 W 的氙灯。系统采用恒定电流驱动,通过精密机械调节,将太阳模拟器输出的直接辐射衰减到所需的日照阈值区间,以保证积分球内有效辐照面上直接辐照度的稳定。

3.2.2 积分球内壁散射辐照度设计

积分球匀光的目的是利用内壁模拟散射天空背景,避免 RPSDR 校准过程中背景能量不断变化造成校准结果难以复现的问题。实际校准中,太阳模拟器导入积分球的直接辐射被精密机械衰减结构衰

减到 $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 由太阳模拟器引入积分球内壁的辐照度能量约为 $0.192 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。考虑到太阳模拟器入口对向的光陷阱对直接辐照度的吸收, 由太阳模拟器引入积分球的能量相较于日照阈值校准可忽略不计。为此, 在积分球穹顶设计另一组氙灯, 用于模拟太空散射背景。根据光度学原理, 氙灯的光通量可表示为

$$\phi = 683K \int \nu(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

式中: ϕ 为氙灯辐射光通量; $\nu(\lambda)$ 为人眼视觉函数; $\varphi(\lambda)$ 为辐射通量相对谱密度; K 为比例系数。

根据(3)式, 氙灯辐射通量与其相对谱密度的比例系数 $K^{[17]}$ 为

$$K = \frac{\phi}{683 \int \nu(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}. \quad (4)$$

因此, 氙灯的总辐射通量为

$$\phi_g = K \int \varphi(\lambda) d\lambda = \frac{\phi \cdot \varphi(\lambda) d\lambda}{683 \int \nu(\lambda) \varphi(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

式中: ϕ_g 为积分球穹顶氙灯的总辐射通量。

根据积分球的性质, 同时考虑氙灯辐射效率和光谱校正损失, 则内壁辐照度为

$$E_d = \frac{\phi_g \eta_e (1 - \epsilon)}{4\pi R^2} \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (6)$$

式中: E_d 为积分球内壁的散射辐照度; η_e 为氙灯辐射效率, 取值为 90%; ϵ 为光谱校正损失, 取值为 40%; R 为积分球半径, 取值为 1000 mm; ρ 为积分

表 1 未校正氙灯与 AM1.5 A 级太阳光谱能量分布数据

Table 1 Solar spectral energy distribution data of uncorrected xenon lamp and AM1.5 of class A

Wave band / nm	Ratio of spectral irradiance to global irradiance in 400–1100 nm / %		Ratio of energy between uncorrected xenon lamp and AM1.5
	Uncorrected xenon lamp	AM1.5	
400–500	17.1996	18.5	0.9297
500–600	13.5835	20.1	0.6758
600–700	10.9131	18.3	0.5963
700–800	10.3651	14.8	0.7003
800–900	13.5626	12.2	1.1117
900–1100	34.3761	16.1	2.1352

滤光片材料选择在 400~1100 nm 波段内是透明的材料, 以保证 400~900 nm 间的氙灯能量损耗尽量小, 而将 900~1100 nm 之间偏离 A 级太阳光谱的辐射次峰滤掉, 滤光片的理论光谱透射率可表示为

$$a = \sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} b, \quad T = \frac{C}{Ka}, \quad (7)$$

球内壁反射率, 取值为 95%。

在自然环境下, 天空散射辐射与太阳直接辐射的比例是随天气条件变化而变化的, 在积分球中模拟校准日照阈值时的天空散射背景, 设计天空散射辐射与太阳直接辐射之比分别为 50%、100% 和 150%, 即对应的积分球内壁散射辐照度分别为 60, 120, 180 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 根据(6)式, 积分球穹顶氙灯功率应分别为 73.5, 147.0, 220.5 W。积分球穹顶采用三支滨松 75 W 氙灯构成氙灯组, 将其设计为独立三档, 通过调节氙灯打开的数量控制球壁散射辐照度。

3.3 光谱匹配设计

人工模拟日照环境, 光源能量在波长 300~2500 nm 范围内应能够与 AM1.5 A 级太阳光谱辐照度相匹配, 各谱段内光谱失配误差在 20% 以内^[18]。尽管氙灯光谱分布接近于真实太阳光谱, 但是根据氙灯光谱与 AM1.5 A 级太阳光谱能量分布数据(表 1), 氙灯在 500~800 nm 间的能量与 AM1.5 A 级太阳光谱段内的光谱能量之比低于 0.8, 而 900~1100 nm 谱段内线光谱的存在使该谱段内氙灯光谱能量与 AM1.5 A 级太阳光谱段内的能量之比远大于 1.2, 整体难以达到 AM1.5 A 级太阳光谱的分布要求^[19]。考虑到被校 RPSDR 的传感器为热释电器件, 其响应曲线并不平坦, 为此, 针对上述几个谱段设计光学滤光片, 在滤除和削弱氙灯光源部分红外波段能量的同时, 通过设计使光谱能量分布满足 AM1.5 A 级太阳光谱能量分布。

式中: a 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段内未经光谱校正的氙灯辐照度; b 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 谱段内未经光谱校正的氙灯光谱辐照度密度; C 为同谱段内 AM1.5 A 级太阳光谱辐照度; K 为氙灯光谱全谱段辐照度与 A 级太阳光谱全谱段辐照度的归一化因子; T 为该谱段内滤光片的光谱透射率理论值。

由于 C 为已知的 A 级太阳光谱辐照度, a 为测

量值,滤光片光谱透射率是相对值,故在计算中可将 K 省略,经计算将滤光片的光谱透射率波段确定为 $400\sim 800\text{ nm}$,平均透射率 $T\geq 95\%$, 930 nm 处透射率约为 $20\%(\pm 5\%)$, $1200\sim 2500\text{ nm}$ 内的平均透射率 $T\geq 83\%$ 。考虑短弧氙灯的高温,基片材料采用光学玻璃 K9,在波长 $400\sim 1100\text{ nm}$ 范围内,其折射率 $n=1.52$,透射率基本不变且大于 90% ,光谱透射率设计曲线如图 4 所示。在膜层设计方面,由于氙灯的工作温度高,膜层材料必须耐高温且有较小的折射率温度系数,综合考虑材料的机械强度、化学稳定性及实际镀膜可行性,最终膜层材料选择低折射率材料二氧化硅($\text{SiO}_2, n=1.47$)、高折射率材料钛化合物($\text{H}_4, n=2.03$)和匹配层材料三氧化二铝(Al_2O_3)。经过多层制膜工艺并调节膜层厚度,滤光片能够滤除约 80% 的波长为 930 nm 的光,满足设计要求。

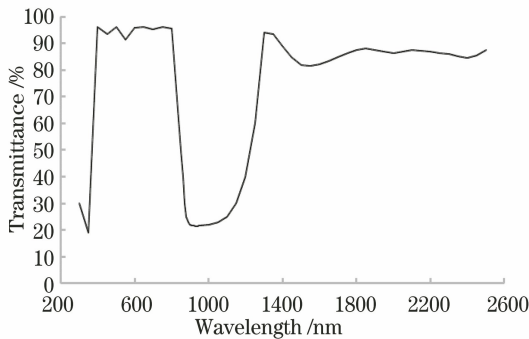


图 4 膜层光谱透射率设计曲线

Fig. 4 Design curve of spectral transmittance of coating film

4 系统性能测试与分析

为验证双光源积分球日照计校准系统性能,对校准系统有效辐照面的阈值辐照度均匀性、稳定性以及光谱匹配度进行测试。

4.1 辐照度均匀性

有效辐照面内的辐照度均匀性通过环形等角采样的方法进行测试^[18,20-22],测试点分布如图 5 所示,选取 $\Phi 60\text{ mm}$ 和 $\Phi 160\text{ mm}$ 两个同心圆,以 45° 等间隔划分同心圆,选取圆心和同心圆边缘共 9 个测试点。

打开一盏穹顶氙灯,调节太阳模拟器输出直接辐射为 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,将二等标准总辐射表依次固定于测试点上,测得辐照度值分布如图 6 所示,除了中心点 O 和 $\Phi 160\text{ mm}$ 边缘 $A、B$ 辐照度值介于 $120\sim 125\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,其余大部分测试点的辐照

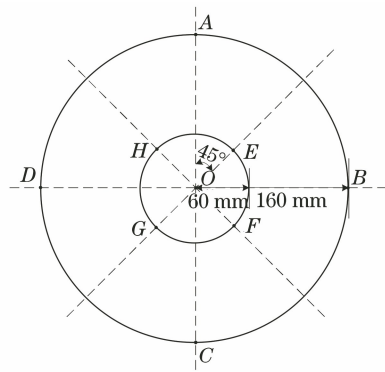


图 5 有效辐照面上辐照度均匀性测试点示意图

Fig. 5 Diagram of test points of irradiance uniformity on effective irradiation surface

度值在 $115\sim 120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。有效辐照面内的辐照度均匀性可表示为

$$u = \left| \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right| \times 100\%, \quad (8)$$

式中: u 为有效辐照面内的辐照度均匀性; E_{\max} 为各测试点辐照度的最大值; E_{\min} 为各测试点辐照度的最小值。含中心点时有效辐照面内的辐照度均匀性为 2.5% ,不含中心点时为 1.6% ,满足有效辐照面内辐照度均匀性在 3% 以内的要求。

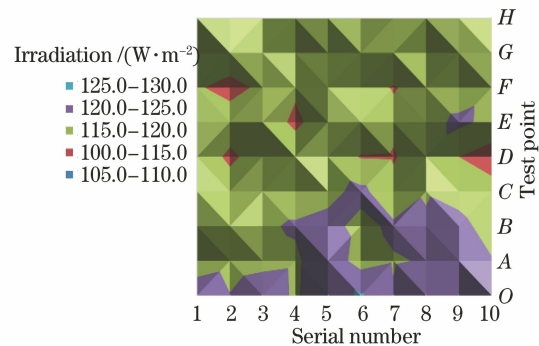


图 6 均匀性测试点的辐照度分布

Fig. 6 Irradiance distribution of uniformity test points

4.2 辐照度稳定性

打开一盏穹顶氙灯,调节太阳模拟器输出直接辐射为 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,将二等标准总辐射表安装在有效辐照面中心点,如图 7 所示。

闭合积分球,稳定 5 min ,按 1 min 采样间隔采集二等标准总辐射表输出的辐照度值,校准系统阈值点辐照度的稳定性^[18,20-22]可表示为

$$s = \left| \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} \right| \times 100\%, \quad (9)$$

式中: s 为有效辐照面内阈值点辐照度的稳定性; E'_{\max} 为测试时间段内辐照度的最大值; E'_{\min} 为测试时间段内的辐照度最小值。



图 7 有效辐照面稳定性测试

Fig. 7 Stability test for effective irradiation surface

取 1 h 采样值,辐照度数据变化如图 8 所示,尽管辐照度随时间的推移逐渐增大,但是整体辐照度仍在 $122 \sim 124 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,增势缓慢。根据(9)式,计算有效辐照面内每小时的阈值点辐照度的稳定性为 0.68%,不超过 1%,这满足室内阈值测试要求。

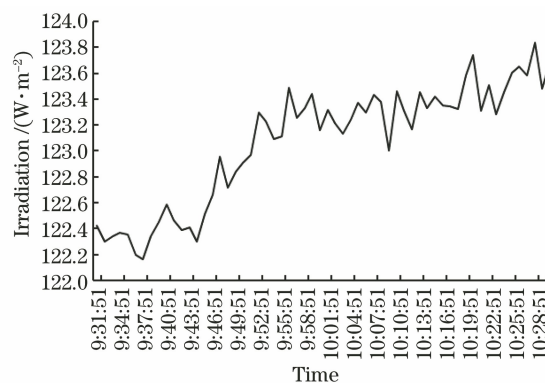


图 8 1 h 内阈值点辐照度数据的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of irradiance at threshold point within 1 h

4.3 光谱匹配度

利用光谱仪对经滤光片校正后的氙灯光谱辐照度进行测试,其光谱能量与 AM1.5 A 级太阳光谱能量的比例如表 2 所示,介于 0.8~1.2 之间,能够匹配 AM1.5 A 级太阳光谱能量分布。

表 2 校正氙灯光谱能量与 AM1.5 A 级太阳光谱能量的分布

Table 2 Energy distributions of corrected xenon lamp spectrum and AM1.5 class A solar spectrum

Wave band /nm	Ratio of spectral irradiance to global irradiance in 400–1100 nm		Energy ratio of corrected xenon lamp to AM1.5	Matching condition
	Corrected xenon lamp	AM1.5		
400–500	19.72	18.5	1.066	Yes
500–600	18.69	20.1	0.930	Yes
600–700	17.89	18.3	0.978	Yes
700–800	16.31	14.8	1.102	Yes
800–900	12.37	12.2	1.014	Yes
900–1100	15.02	16.1	0.933	Yes

当未安装滤光片时,打开一盏积分球穹顶氙灯,调节太阳模拟器的输出直接辐照度为 $(120 \pm 5) \text{ W/m}^2$,由被校 RPSDR 测得日照阈值为 132.7 W/m^2 ;保持穹顶氙灯和太阳模拟器的输出不变,安装滤光片,使氙灯光谱能量修正到 AM1.5 A 级太阳光谱能量,此时被校 RPSDR 测得的日照阈值为 129.3 W/m^2 。可见,通过修正氙灯光源的光谱分布使其匹配自然太阳光谱能量分布,可使日照阈值校准误差下降 3.4 W/m^2 。

5 RPSDR 校准与验证分析

利用双氙灯光源积分球日照计校准系统,建立在室内进行日照阈值校准、在室外进行日照时数验证的综合性 RPSDR 校准方法。首先将被校 RPSDR 置于校准系统中进行日照阈值校准,然后将校准后的 RPSDR 安装到室外平台,将其与直接辐

射表进行日照时数同步比对测试,以验证校准系统的有效性。

室内阈值校准选用日本 EKO 生产的 MS-90 型 RPSDR 作为标准器,其编号为 S18089.10,阈值为 $121.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,该日照计在国家气象计量站长期用于与标准直接辐射表在室外进行日照时数比对测试,其日累计日照时数的误差在 5% 以内,可作为参考标准使用。被校日照计为国产 RPSDR,编号为 SDR202001。校准实验如图 9 所示,将标准 RPSDR 安装在双氙灯光源积分球日照计校准系统安装平台上,打开太阳模拟器和一盏穹顶氙灯,闭合积分球体后,利用标准 RPSDR 采集直接辐射值,同时通过精密调节太阳模拟器输出,将标准 RPSDR 输出的直接辐射控制在 $(120 \pm 5) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 以内,稳定输出维持 5 min 后,采集 10 组标准 RPSDR 输出的直接辐射值作为标准阈值,数据见表 3;然后打开积分球,

拆下标准 RPSDR, 换上被校 RPSDR, 稳定输出维持 5 min 后, 采集 10 组被校 RPSDR 输出的直接辐射值作为被校阈值。

从表 3 可见, 标准阈值和被校阈值的平均值分别为 $121.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $130.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 则被校 RPSDR 的阈值修正值为 $-8.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 重复前述校准实验, 校准后 RPSDR 的日照阈值较标准阈值平均偏差仅为 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 被校阈值标准偏差由校准前的 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 下降为 $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这说明室内阈值校准环境比较稳定。

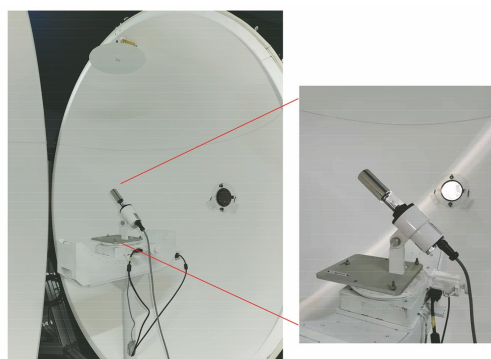


图 9 阈值校准实验

Fig. 9 Threshold calibrating test

表 3 校准前后被校阈值与标准阈值的平均偏差和标准偏差对比

Table 3 Comparison of mean deviation and standard deviation of calibrated threshold and standard threshold before and after calibration

Serial number	Before calibration			After calibration		
	Standard threshold	Uncalibrated threshold	Deviation	Standard threshold	Calibrated threshold	Deviation
1	121.8	129.9	8.1	121.3	121.6	0.3
2	121.6	130.3	8.7	121.1	121.7	0.6
3	122.1	130.3	8.2	121.1	121.6	0.5
4	121.9	130.3	8.4	121.3	121.9	0.6
5	121.4	130.5	9.1	120.9	121.4	0.5
6	121.5	130.1	8.6	121.3	121.3	0.0
7	121.7	130.5	8.8	121.6	121.5	-0.1
8	121.7	129.6	7.9	121.4	121.5	0.1
9	121.9	130.0	8.1	121.4	121.8	0.4
10	122.0	129.9	7.9	121.2	121.4	0.2
Mean	121.8	130.1	8.3	121.3	121.6	0.3
Standard error	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3

为说明积分球模拟天空条件下阈值校准相较于室外自然散射天空条件下阈值校准具有校准误差小、数值稳定、复现性好等优势, 且其能够代替实际天空开展阈值校准, 将未校准的 RPSDR 安装到室外平台, 同时, 在室外平台上安装标准 RPSDR, 以开展同步阈值比对测试。测试时间为 2020 年 6 月 13—15 日, 测试期间天空背景散射环境多样, 其中 2020 年 6 月 13 日的天气为阴转晴, 14 日为晴, 15 日为多云。采样间隔为 10 s, 以标准 RPSDR 为参考, 选取标准 RPSDR 输出直接辐照度在 $(120 \pm 5) \text{ W}/\text{m}^2$ 内的同步阈值数据进行比对, 数据如表 4 所示。在自然天空环境下, 日照阈值为 $120 \text{ W}/\text{m}^2$ 左右的直接辐照度很难捕获, 晴天仅日出和日落附近时间存在直接辐照度数据, 且数据量较少。如表 4 所示, 2020 年 6 月 13 日日落时段仅 4 个数据满足阈值条件; 14 日日出时段仅 3 个数据满足阈值条

件, 日落时段则仅 4 个数据满足阈值条件; 多云天气条件下, 随着云的漂移, 标准 RPSDR 能够随机测量到满足阈值条件的直接辐照度值, 但是由于云漂移速度的不同, 数据波动较大。如表 4 所示: 2020 年 6 月 15 日满足阈值条件的数据为 5 个, 且这几个数据出现的时间随机; 阴天则无法测得这个量级的直接辐照度, 例如 2020 年 6 月 13 日的天气是阴转晴, 所以日出时段没有数据满足阈值条件; 被校 RPSDR 的阈值平均误差范围为 $9.3 \sim 10.3 \text{ W}/\text{m}^2$, 相较于室内校准时的阈值平均误差 $8.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 偏大。利用极差法、基于标准阈值和被校阈值计算标准偏差。表 4 结果显示, 无论是标准阈值的标准差, 还是被校阈值的标准差, 室外校准的结果都比室内校准大一个量级, 说明室外校准时, 天空散射背景难以统一, 造成阈值数据波动较大, 难以实现计量复现性。

表 4 阈值比对测试数据

Table 4 Test data of threshold comparison

$W \cdot m^{-2}$

Time	Threshold measured by standard RPSDR	Threshold measured by uncalibrated RPSDR	Deviation
2020-06-13T19:25:20	124.3	135.7	11.4
2020-06-13T19:25:30	122.1	131.1	9.0
2020-06-13T19:25:40	119.7	129.6	9.9
2020-06-13T19:25:50	115.2	123.4	8.2
Mean	120.3	129.2	9.6
Standard error	4.4	6.5	1.6

Time	Threshold measured by standard RPSDR	Threshold measured by uncalibrated RPSDR	Deviation
2020-06-14T06:13:10	116.4	126.3	9.9
2020-06-14T06:13:20	119.6	130.4	10.8
2020-06-14T06:13:30	123.9	134.1	10.2
Mean	120.0	130.3	10.3
Standard error	4.4	4.6	0.5

Time	Threshold measured by standard RPSDR	Threshold measured by uncalibrated RPSDR	Deviation
2020-06-14T19:26:30	124.8	134.3	9.5
2020-06-14T19:26:30	123.0	132.9	9.9
2020-06-14T19:26:30	121.8	130.5	8.7
2020-06-14T19:26:30	118.4	127.6	9.2
Mean	122.0	131.3	9.3
Standard error	3.1	3.3	0.6

Time	Threshold measured by standard RPSDR	Threshold measured by uncalibrated RPSDR	Deviation
2020-06-15T11:05:50	123.5	134.1	10.6
2020-06-15T11:06:00	124.9	135.8	10.9
2020-06-15T11:06:10	120.7	129.9	9.2
2020-06-15T11:06:20	119.0	127.3	8.3
2020-06-15T11:06:30	116.3	125.4	9.1
Mean	120.9	130.5	9.6
Standard error	3.7	4.5	1.1

采用室内阈值校准获得的修正值对被校 RPSDR 进行修正,然后利用校准后的 RPSDR 与标准直接辐射表开展日累计日照时数比对测试。标准直接辐射表选用 SHP1 型数字直接辐射表,其编号为 170006,该直接辐射表已经国家气象计量站校准,性能可靠。比对测试时间为 2020 年 7 月 22—25 日,其中 22 日和 25 日为多云天气,23 日和 24 日为晴朗天气,测试数据如表 5 所示。经阈值校准后 RPSDR 的晴天日照时数与标准值的相对误差在 1%以内,在 2020 年 7 月 22 日和 25 日的多云天气

条件下,总体日照时数偏小导致 RPSDR 测量的日照时数相较于标准直接辐射表测量的日照时数的相对误差分别为 4.7%和 6.8%,但是其对应的绝对误差分别为 0.26 h 和 0.19 h,满足气象领域对日照时数日累计值误差为 ± 1 h 或 $\pm 10\%$ (取较大者)的要求,即当单日累计的日照时数观测值在 10 h 以内时,判断观测仪器是否准确的最大允许误差为 ± 1 h,当单日累计的日照时数观测值不低于 10 h 时,判断观测仪器是否准确的最大允许误差则为 $\pm 10\% \times$ 观测值。

表 5 日照时数测试数据比对

Table 5 Comparison of test data of sunshine duration

Date	Sunshine duration measured by standard pyrhelimeter /h	Sunshine duration measured by RPSDR /h	Absolute error /h	Relative error /%
2020-07-22	5.50	5.76	0.26	4.7
2020-07-23	11.50	11.61	0.11	1.0
2020-07-24	9.04	9.08	0.04	0.4
2020-07-25	2.79	2.98	0.19	6.8

6 结 论

针对 RPSDR 的组成结构和测量原理,设计了一种双氙灯光源积分球系统,提出了基于该系统校准 RPSDR 的新方法。校准系统利用太阳模拟器的氙灯光源导入积分球以模拟直接辐射,利用积分球穹顶氙灯模拟散射辐射;通过设计积分球参数,分析氙灯辐照度分布和光谱匹配,实现了一个均匀、稳定、贴近太阳光源的 RPSDR 校准环境,建立了在室内进行日照阈值校准、在室外进行日照时数验证的综合性 RPSDR 校准方法。通过对校准系统进行测试,得到校准系统的有效辐照面内辐照度均匀性在含中心点时不超过 2.5%,不含中心点时不超过 1.6%,有效辐照面内每小时的阈值点辐照度稳定度为 0.68%,氙灯光源能量分布与 AM1.5 A 级太阳光谱能量分布相匹配,可满足在室内对 RPSDR 开展日照阈值校准的测试环境条件。选取一台 RPSDR 进行室内阈值校准实验,校准前后被校 RPSDR 的日照阈值与标准阈值的平均偏差由 $8.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 减小为 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,将该校准后的 RPSDR 置于室外,基于校准后的 RPSDR 与标准直接辐射表进行 4 d 的日照时数比对实验。结果显示,在晴天条件下,校准后的 RPSDR 的日累计日照时数相较于参考标准的误差在 1%以内,在多云天气条件下的绝对误差不超过 0.26 h,这满足气象行业对日照时数的观测要求。下一步将重点研究 RPSDR 的测量机制,以改善其在多云天气条件下测量误差偏大的问题。

参 考 文 献

- [1] WMO. Guide to meteorological instruments and methods of observation [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2018: 299-301.
- [2] Chong W, Lü W H, Zhang J, et al. Modeling and validation analysis of Sigmoid function for solar radiation diffuse fraction [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1901001.
崇伟, 吕文华, 张健, 等. 太阳辐射散射分数 Sigmoid 函数建模与验证分析 [J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1901001.
- [3] Lü W H, He X L, Yu H J, et al. Development of full-automatic solar tracker and its applications [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2544-2550.
吕文华, 贺晓雷, 于贺军, 等. 全自动太阳跟踪器的研制和应用 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2544-2550.
- [4] Zhao S J, Liu X C, Gao T C, et al. Analysis of key technologies of sunshine detector based on direct radiation measurement in operational application [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2011, 6(6): 457-462.
赵世军, 刘西川, 高太长, 等. 直接辐射式日照计业务应用关键技术分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(6): 457-462.
- [5] Lü W H, Chong W, Ding L. Test and analysis on performance comparison of photoelectric automatic sunshine duration recorder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 928-933.
吕文华, 崇伟, 丁蕾. 光电式自动日照计性能比对试验与分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 928-933.
- [6] China Meteorological Administration. Surface meteorological observation specification [R]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
中国气象局. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [7] Möllenkamp J, Beikircher T, Häberle A. Recalibration of SPN1 pyranometers against pyrhelimeter and its relevance for the evaluation of concentrating solar process heat plants [J]. Solar Energy, 2020, 197: 344-358.
- [8] Xu Q Y, Zheng X B, Zhang W, et al. Advanced calibration method for sun radiometers [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1337-1342.
徐秋云, 郑小兵, 张伟, 等. 太阳辐射计先进定标方法研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1337-1342.
- [9] Zhai W C, Li J J, Zheng X B, et al. Research on method of calibrating sun channels of sun radiometers [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412004.
翟文超, 李健军, 郑小兵, 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412004.
- [10] Jia R D, Xia Z W, Wang Y P, et al. Absolute solar spectral irradiance measurement and its calibration monochromator [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(8): 1097-1101.
贾瑞栋, 夏志伟, 王玉鹏, 等. 太阳光谱辐照度绝对测量及其定标单色仪 [J]. 发光学报, 2017, 38(8): 1097-1101.
- [11] Kim B Y, Lee K T, Zo I S, et al. Calibration of the pyranometer sensitivity using the integrating sphere [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 54(4): 639-648.
- [12] Liu H X, Sun J X, Liu Z X, 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.
- [13] Yang L H, Yan D Y, Shi R L. Research of integrating sphere solar simulating source [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, 22(2): 116-119.
- 杨林华, 闫达远, 史瑞良. 积分球太阳辐照模拟源的研制[J]. *航天器环境工程*, 2005, 22(2): 116-119.
- [14] Yang J J, Zhang G Y, Sun G F, et al. Research on the calibration system and calibration method of photoelectric sunshine duration recorder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11): 2805-2812.
- 杨俊杰, 张国玉, 孙高飞, 等. 光电式日照计定标系统与校准方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(11): 2805-2812.
- [15] Ikeda H, Aoshima T, Miyake Y. Development of a new sunshine-duration meter [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1986, 64(6): 987-993.
- [16] Liu S. Study on key technique of collimation solar simulator with high-precision [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 23-27.
- 刘石. 高精度准直式太阳模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 23-27.
- [17] Meng H F, Xu G N, Zhang J C, et al. Comparison of photoelectric performance measurements for GaInP/InGaAs/Ge triple-junction space solar cells based on solar simulator and high altitude natural sunlight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0312004.
- 孟海凤, 徐国宁, 张俊超, 等. 模拟太阳光与高空自然光条件下航天用三结砷化镓太阳能电池光电性能测量对比[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0312004.
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: meteorological solar simulator. GB/T 33707—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 气象太阳模拟器 GB/T 33707—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] Li Q, Wang C, Zha J, et al. Spectral characteristic of short-arc xenon lamp and application in solar simulators[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1447-1450.
- 李倩, 王城, 查俊, 等. 短弧氙灯光谱特性及其在太阳模拟器中应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1447-1450.
- [20] The International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices-part 9: classification of solar simulator characteristics: IEC 60904-9-2020 [S]. Geneva: IEC Central Office, 2020.
- [21] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: photovoltaic devices-part 9: solar simulator performance requirements. GB/T 6495.9—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 光伏器件 第 9 部分: 太阳模拟器性能要求 GB/T 6495.9—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [22] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metrological Specifications Standard of the People's Republic of China: calibration specification for solar simulators JJF 1615—2017 [S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing and Media Co., Ltd., 2017.
- 国家质量监督检验检疫总局. 太阳模拟器校准规范 JJF 1615—2017 [S]. 北京: 中国质量标准出版传媒有限公司, 2017.