

光电式日照计定标系统与校准方法研究^{*}

杨俊杰¹, 张国玉^{1,2,3}, 孙高飞^{1,2,3}, 张健¹, 刘石^{1,2,3}

(1. 长春理工大学 长春 130022; 2. 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室 长春 130022;
3. 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心 长春 130022)

摘要:针对目前光电式日照计定标效率低,受天气影响严重,基于太阳模拟、积分球匀光、吸光陷阱以及多维调整等技术,提出了一种光电式日照计室内定标新方法并设计了光电式日照计定标系统。首先根据光电式日照计的组成与工作原理,提出了光电式日照计定标系统的总体设计方案;其次分析研究了直接辐射模拟系统、散射辐射模拟系统以及日地理位置调节系统的主要技术指标;然后根据定标系统各组成部分之间的关联性,建立定标系统的校准链,研究了校准链各组成部分的校准方法,实现了定标结果的可溯源性;最后通过实验验证了光电式日照计定标系统的日照时数模拟误差。实验结果表明,光电式日照计定标系统4 h内的日照时数模拟误差为3.75%,满足现行的光电式日照计定标需求。

关键词: 光电式日照计; 太阳辐射; 太阳高度角; 定标系统; 校准方法

中图分类号: TH765.2⁺² 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on the calibration system and calibration method of photoelectric sunshine duration recorder

Yang Junjie¹, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Sun Gaofei^{1,2,3}, Zhang Jian¹, Liu Shi^{1,2,3}

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, China;
3. Jilin Province Engineering Research Center of Optical Measurement and Control Instrumentation, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at current situation of low efficiency and being affected seriously by the weather in photoelectric sunshine duration recorder calibration process, based on the technology of solar simulation, integrating sphere brightness smoothing, light absorption trap and multidimensional adjustment, a new indoor calibration method for photoelectric sunshine duration recorder is proposed and a photoelectric sunshine duration recorder calibration system is designed. Firstly, according to the composition and operating principle of photoelectric sunshine duration recorder, the overall design scheme of the photoelectric sunshine duration recorder calibration system is put forward. Secondly, the main technical specifications of direct radiation simulation system, scattered radiation simulation system and solar-terrestrial relationship regulating system are studied and analyzed. Then, according to the correlation among the components of the calibration system, the calibration chain of the calibration system is established, and the calibration methods of the components of the calibration chain are studied, and the traceability of the calibration result is realized. Finally, the simulation error of the sunshine hours of the photoelectric sunshine duration recorder calibration system is verified with experiments. The experiment results show that the simulation error of the sunshine hours of the photoelectric sunshine duration recorder calibration system is 3.75% within 4 hours, which satisfies the calibration requirements of current photoelectric sunshine duration recorder.

Keywords: photoelectric sunshine duration recorder; solar radiation; solar elevation angle; calibration system; calibration method

0 引言

太阳辐射作为地球的主要能源与地球环境气候变化、作物生长以及人类活动有着密切的联系。日照时数作为太阳辐射的重要表征因子,其观测结果的准确度对分析太阳直射辐射变化、评估以及预报天气状况、农业以及畜牧业生产、光伏能源开发等领域均有着重要意义。传统日照时数观测仪器为暗筒式日照计与聚焦式日照计^[1],其自动化程度较低、测量结果的主观性强、精度较差、资料可比性和一致性难以保证;近年来随着光电技术的发展以及对日照时数观测需求与数据精度的提高,自动化程度高的太阳直接辐射表与光电式日照计应运而生。其中太阳直接辐射表具有准确度好、精度高的优点,但受太阳自动跟踪装置限制成本极高,难以普及到基层观测站使用;光电式日照计则是利用对总的太阳辐照度和散射太阳辐照度的测量进而实现日照时数的观测,避免了对太阳的跟踪,具有更高的性价比,但作为一种新兴仪器目前仍没有被普遍应用。

由于一定历史与技术的原因,目前我国仍普遍采用暗筒式日照计与聚焦式日照计对日照时数进行观测^[2-3]。20世纪70年代,我国气象工作者开展了对光电式日照计的研究^[4-6],其中2015年吕文华等人^[4]以直接辐射表作为参考标准,开展了国产FS-RZ1型自动日照计、HYSD1型自动日照计和荷兰Kipp&Zonen的CSD3型自动日照计的对比实验研究并进行了统计分析,结果表明光电式日照计具有自动观测、精度高、维护方便等特点,其测试结果满足日照时数自动化业务的观测需求。目前光电式日照计仍采用传统的将标准直接辐射表与待定标光电式日照计在室外进行对比测量的定标方法,此定标方法一般需要花费数月^[7]时间。随着光电式日照计的逐步发展与市场需求,该定标方法已难以满足目前的定标需求。

因此基于上述情况,提出了一种光电式日照计的定标新方法并设计了光电式日照计定标系统^[8],实现了在室内对光电式日照计的定标,有效提高了光电式日照计的定标效率。

1 光电式日照计定标系统

1.1 光电式日照计工作原理

由于日照时数定义^[9]为太阳直接辐射辐照度超过 120 W/m^2 的各分段时间的总和,因此光电式日照计可以基于总辐射测量法,即通过对太阳总辐射和散射辐射的辐照度测量,进而得出太阳直接辐射辐照度。同时,由于不同纬度和时间均会对日照时数的观测产生影响,故光

电式日照计在安装时需要根据观测地区纬度来调整光电式日照计的倾斜角度。

目前典型的光电式日照计由光电感应器件、光筒以及数据采集处理模块组成。光电式日照计的3个光谱特性和角度特性一致的光电感应器件^[10]安装在光筒内,其中1个用于测量全天空的总辐射,另外2个则采用遮光罩以及特殊的全天空分布方式,从而不会同时暴露于阳光下,实现对东、西半天空散射辐射的检测,数据采集处理模块^[6]作用是处理光电传感器测量到的辐照度信号,进而获得太阳直接辐射辐照度,从而实现日照时数的测量。光电式日照计的典型结构如图1所示。



图1 光电式日照计典型结构

Fig. 1 Typical structure of the photoelectric sunshine duration recorder

1.2 光电式日照计定标系统组成与工作原理

在天文学上,太阳相对地球上某一点的视位置可以根据天球模型近似计算^[11],即假设以观察者的眼睛为球心,做一个无穷大的正球体,将所有天体包括太阳投影到天球的球面上,此时,天体的具体位置就可以由其在天球上的投影所描述。

计算太阳在天球中对于地球上某点的相对位置,由该观测点的地理纬度、季节(年、月、日)和时间3个因素来决定的,常以地平坐标系以及赤道坐标系同时表示太阳的位置^[12]。即以高度角、方位角、赤纬以及时角来表示的。太阳在天球中运行的位置如图2所示。

图2中, X 为太阳位置, Z 为天顶, $\angle SOW = A$ 为太阳方位角, $\angle WOX = h$ 为太阳高度角, $\angle TOL = \delta$ 为赤纬, $\angle TOQ' = t$ 为时角, $\angle PON = \phi$ 为地理纬度。 ΔLPZ 构成的球面三角形中,按照球面三角形定理,球面三角形边的余弦等于其他两边余弦的乘积,加上该两边正弦与其夹角余弦的乘积,即:

$$\cos p = \cos l \cos z + \sin l \sin z \cos P \quad (1)$$

将 Z, L, P 的值代入式(1)得:

$$\cos(90^\circ - h) = \cos(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ - \delta) \cos t \quad (2)$$

所以得到太阳高度角的计算公式如式(3)。

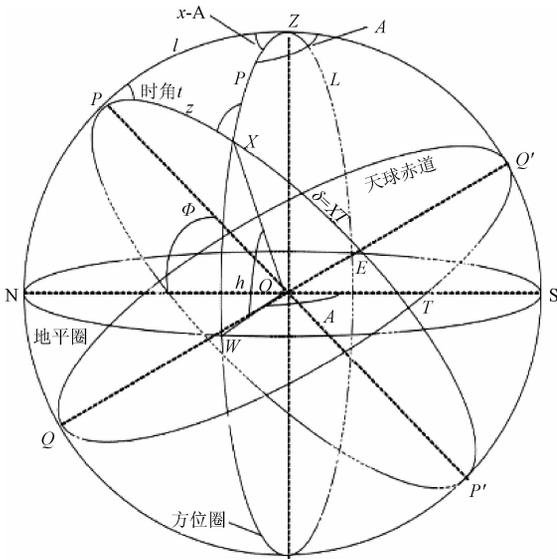


图 2 太阳在天球中运行位置

Fig. 2 The movement position of the sun in the celestial sphere

$$\cosh = \cos\phi\cos\delta + \sin\phi\sin\delta\cos t \quad (3)$$

同样在 ΔLPZ 构成的球面三角形中,运用球面三角形的正弦定理,得到:

$$\frac{\sin p}{\sin P} = \frac{\sin z}{\sin Z} \quad (4)$$

将 p, P, z, Z 的值代入式(4)得:

$$\frac{\sin(90^\circ - h)}{\sin t} = \frac{\sin(90^\circ - \delta)}{\sin A} \quad (5)$$

从而:

$$\frac{\cosh}{\sin t} = \frac{\cos\delta}{\sin A} \quad (6)$$

得到太阳方位角的计算公式如下:

$$\sin A = \frac{\cos\delta\sin t}{\cosh} \quad (7)$$

只要确定了观测地点的时角 t 、赤纬 δ 、地理纬度 ϕ , 就可以求解出该点的太阳高度角和方位角。因此实现光电式日照计与定标系统所模拟的太阳光直射光的相互选择,即可实现对太阳高度角和方位角的模拟。根据光电式日照计工作原理可知,在完成太阳高度角和方位角模拟的前提下,若要完成光电式日照计的定标,仍需实现对光电式日照计实际工作环境中太阳辐射的模拟,其中到达地面的太阳辐射分为以平行光形式直接投射的直接辐射和经散射自天空投射的散射辐射。

根据上述分析可知,可将太阳模拟器技术、积分球技术、吸光陷阱技术以及多维调整技术有效的融合进光电式日照计定标系统的设计过程中,所设计的光电式日照计定标系统由直接辐射模拟系统、散射辐射模拟系统以及日地位置调节系统组成。其中,直接辐射模拟系统为

待定标的光电式日照计提供具有真实太阳辐照特性的光源;散射辐射模拟系统由背景散射模拟装置和直射辐射抑制装置组成,背景散射模拟装置实现对天空散射光背景的模拟,直射辐射抑制装置则用于吸收直接辐射模拟系统的直接辐射光,直接辐射模拟系统与散射辐射模拟系统相配合即可实现光电式日照计工作光环境的准确还原;日地位置调节系统能够模拟日地相对运动,实现在不同太阳高度角条件下光电式日照计的定标。

2 定标系统主要技术指标分析

2.1 直接辐射模拟系统

为了尽量与光电式日照计工作环境相一致,直接辐射模拟系统应在辐照度、准直角、光谱匹配性等方面尽量与真实的太阳直射相近。由于在不同的天气状况下太阳直接辐射辐照度变化范围很大^[13],晴天时可达到 $1\ 367\ \text{W}/\text{m}^2$,阴天有时不足 $100\ \text{W}/\text{m}^2$,因此将直接辐射模拟系统的辐照度调节范围定为 $100 \sim 1\ 367\ \text{W}/\text{m}^2$ 。

同时由于光电式日照计在 $350 \sim 1\ 100\ \text{nm}$ 具有很好的光谱灵敏度,同时需保证直接辐射模拟系统的光谱分布尽量与实际太阳光谱保持一致,因此要求直接辐射模拟系统光谱匹配度满足 AM1.5A 级标准。

由于直接辐射模拟系统辐照面需要覆盖光电式日照计的全部光筒,且目前光电式日照计的光筒长度设计最大为 $120\ \text{mm}$,因此将直接辐射模拟系统的辐照面直径选为 $180\ \text{mm}$ 。同时,因为光电式日照计定标系统需要长时间工作,因此对直接辐射模拟系统的不均匀度、不稳定性也有较高的要求。

根据上述分析,结合目前太阳模拟技术的研究现状^[14-15],直接辐射模拟系统指标如表 1 所示。

表 1 直接辐射模拟系统指标

Table 1 Specifications of the direct radiation simulation system

技术指标	指标要求
辐照度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$100 \sim 1\ 367$
准直角	$2^\circ \pm 10'$
光谱	AM1.5 的 A 级
辐照面直径/mm	$\Phi 180$
不均匀度/%	± 10
不稳定性/ $(\% \cdot \text{h}^{-1})$	1

2.2 散射辐射模拟系统

2.2.1 背景散射模拟装置

背景散射模拟装置由积分球与背景光源组成,背景光源发出的光束射入积分球内发生多次反射,产生积分

效应^[16],消除了由于背景光源自身特性而造成的出射光束的不均匀性,从而实现天空背景散射的模拟。

根据直接辐射模拟系统辐照面直径可知,积分球直接辐射通光接口直径至少应为180 mm,虽然积分球的大小并不影响内部辐照度的均匀性,但是由于光电式日照计与多维工作台均置于积分球内部,都会影响匀光效果,且较大的积分球直径和较小的开口比会改善空间性能^[17]。因此将积分球直径选为2 m,直接辐射通光接口直径选为180 mm。

背景光源由氙灯组成,与直接辐射模拟系统相配合,实现对不同的总辐射与散射辐射情况模拟。为了实现多种背景散射辐射情况的模拟,因此要求在积分球内达到500 W/m²的辐照度,且辐照不稳定性与光谱匹配指标与直接辐射模拟系统一致。

2.2.2 直接辐射抑制装置

直接辐射抑制装置光轴与直接辐射模拟系统光轴重合,其工作原理为利用内壁低反射率涂层^[18],使直接辐射光束在装置内经多次反射后被内壁涂层吸收。由于直接辐射模拟系统的辐照度最高可以达到1 367 W/m²,因此为了使直接辐射光束能够尽可能的在抑制装置内进行漫反射,抑制装置直径选为2 m;同时由于直接辐射模拟系统的准直角为±1°,为了避免直接辐射模拟系统的光束对散射辐射模拟系统造成影响,因此直射辐射抑制接口直径应为250 mm。

综上所述,散射辐射模拟系统的设计指标如表2所示。

表2 散射辐射模拟系统指标

Table 2 Specifications of the scattered radiation simulation system

技术指标	指标要求
直接辐射通光接口/mm	Φ180
直射辐射抑制接口/mm	Φ250
积分球直径/m	2
积分球反射率/%	高于96
辐照度/(W·m ⁻²)	0~500
不稳定性/(%·h ⁻¹)	1
光谱	AM1.5的A级
直接辐射抑制装置直径/m	2
直接辐射抑制装置接口/mm	Φ250

2.3 日地位置调节系统

由于地球在绕太阳公转的过程中,地轴始终与轨道面倾斜成66°34',因此当地球处在轨道上不同位置时,地球表面的太阳高度是不同的。同时由于地球自转,同一地区不同时刻的太阳高度角也不尽相同^[19]。在太阳辐

照度相同而太阳高度角不同的环境中,光电式日照计传感器接收到的辐照度不尽相同,因此需要在不同太阳高度角情况下对光电式日照计进行定标。

日地位置调节系统需要包含横滚与俯仰两种运动^[20],以模拟地球自转及绕太阳公转时光电式日照计观测日照时的太阳高度角。日地位置调节系统技术指标如表3所示。

表3 日地位置调节系统指标

Table 3 Specifications of the solar-terrestrial relationship regulating system

技术指标	指标要求
横滚范围	0°~180°
俯仰范围	-25°~+25°
分辨率	1'

3 定标系统的校准方法与校准结果

根据定标系统的各组成部分的关联性,利用由3个经过计量院定标的相对位置和相对角度与光电式日照计完全一致的辐照计组成的光电式日照计模拟系统,建立定标系统的校准链,如图3所示。其中光电式日照计模拟系统能够实现太阳总辐射与散射辐射模拟量的准确测量。

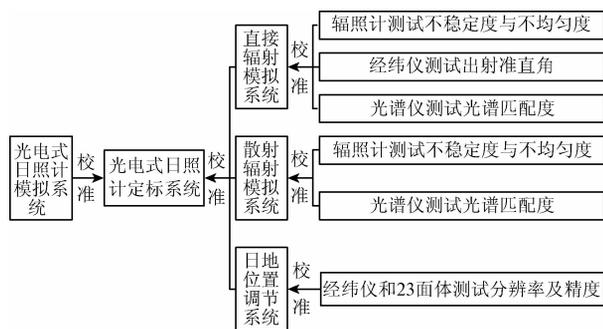


图3 定标系统校准链

Fig. 3 Calibration chain of the calibration system

从图3中可知,定标系统的校准结果可以溯源到中国计量院对辐照计、经纬仪、光谱仪以及23面体的定标结果。

3.1 直接辐射模拟系统校准

直接辐射模拟系统主要需要对其辐照度、辐照面不均匀度、辐照不稳定性、光谱匹配度以及光束准直角进行校准^[21]。

3.1.1 辐照度与辐照面不均匀度测试

辐照度与辐照面不均匀度可以采用环形等角采样法

进行测试,即在辐照面范围内从中心到边缘选取 9 个点进行测量,采样点分布如图 4 所示。

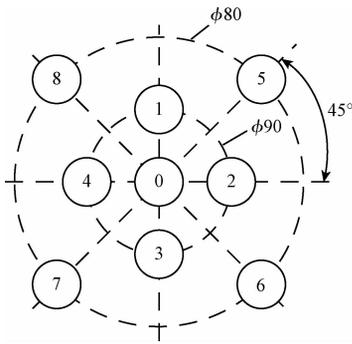


图 4 直接辐射模拟系统辐照面采样点分布

Fig. 4 Sampling point distribution pattern of the irradiated surface of the direct radiation simulation system

将直接辐射模拟系统的辐照度从 1 367 W/m² 至 100 W/m² 间隔 200 W/m² 进行采样测试,系统辐照面不均匀度可以表示为:

$$\varepsilon_1 = \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}} \quad (8)$$

其测试结果如图 5 所示。

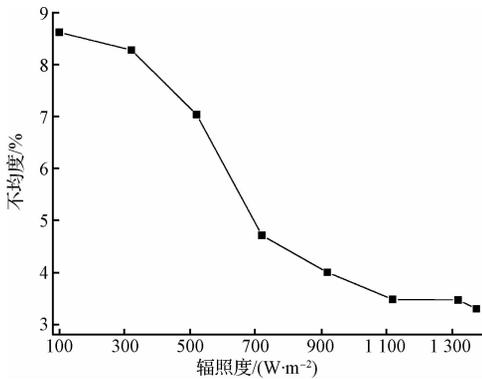


图 5 直接辐射模拟系统不均匀度

Fig. 5 Non-uniformity of the direct radiation simulation system

从图 5 中可以看出直接辐射模拟系统的辐照度从 100 ~ 1 367 W/m² 可调,且最大辐照面不均匀度为 8.61%。

3.1.2 辐照不稳定性测试

将直接辐射模拟系统的辐照度从 1 367 W/m² 至 100 W/m² 间隔 200 W/m² 调节,同时每小时间隔 5 min 采样测试,则系统辐照不稳定性可以表示为:

$$\frac{\Delta E}{E}/T = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} 100\% / T \quad (9)$$

其测试结果如图 6 所示。

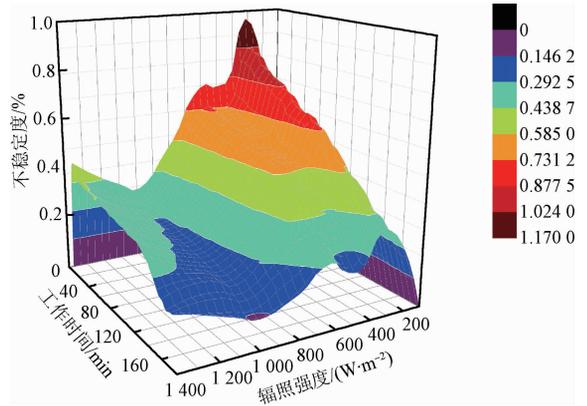


图 6 直接辐射模拟系统不稳定性

Fig. 6 Unstability of the direct radiation simulation system

从图 6 中可以看出直接辐射模拟系统辐照不稳定性随着工作时间与辐照度增长呈现逐渐变好的趋势,最大辐照不稳定性为 0.975% /h。

3.1.3 光谱匹配度测试

利用光谱仪对直接辐射模拟系统的光谱匹配度进行测试,其光谱如图 7 所示,光谱匹配度如表 4 所示。

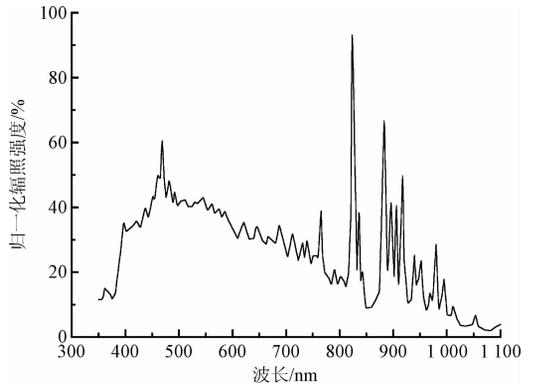


图 7 直接辐射模拟系统光谱匹配

Fig. 7 Spectral matching of the direct radiation simulation system

表 4 直接辐射模拟系统光谱匹配结果

Table 4 Spectral matching results of the direct radiation simulation system

波长间隔/ μm	测量光谱 相对分布/%	AM1.5A 级匹配 范围/%	匹配 情况
0.4 ~ 0.5	21.27	14.8 ~ 22.2	匹配
0.5 ~ 0.6	20.91	16.08 ~ 24.12	匹配
0.6 ~ 0.7	16.98	14.64 ~ 21.96	匹配
0.7 ~ 0.8	13.39	11.84 ~ 17.76	匹配
0.8 ~ 0.9	13.37	9.68 ~ 14.52	匹配
0.9 ~ 1.1	14.08	12.88 ~ 19.32	匹配

3.1.4 光束准直角测试

利用经纬仪测得直接辐射模拟系统的准直角光阑边缘的水平与垂直方向的角度差,即可实现对光束准直角的校准,测量结果如表5所示。

表5 直接辐射模拟系统准直角测试结果
Table 5 Collimation angle test results of the direct radiation simulation system

测量方向	边缘读数		光束准直角
水平	40°15'25"	42°25'10"	2°9'45"
垂直	89°32'23"	91°41'51"	2°9'28"

3.2 散射辐射模拟系统校准

散射辐射模拟系统主要对其辐照不稳定度和光谱匹配进行校准。通过调节氙灯电流控制氙灯输出的光通量,待工作稳定后,将辐照计置于积分球内部进行测试。散射辐射模拟系统的辐照度在0~500 W/m²,以间隔为100 W/m²调节,每小时间隔5 min对其辐照不稳定度进行测试,测试结果如图8所示。

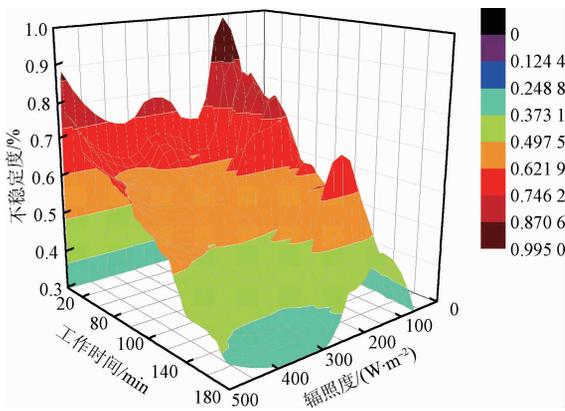


图8 散射辐射模拟系统不稳定性

Fig. 8 Unstability of the scattered radiation simulation system

从图8可以看出散射辐射模拟系统辐照不稳定度随着工作时间的增加呈现逐渐变好的趋势,最大的辐照不稳定度为0.987%/h。

利用光谱仪对其光谱匹配度进行测试,其光谱如图9所示,光谱匹配度如表6所示。

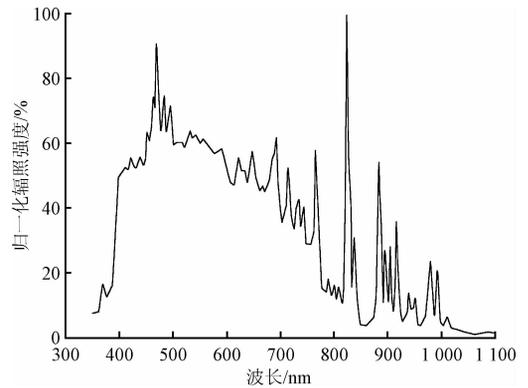


图9 散射辐射模拟系统光谱匹配

Fig. 9 Spectral matching of the scattered radiation simulation system

表6 散射辐射模拟系统光谱匹配结果

Table 6 Spectral matching results of the scattered radiation simulation system

波长间隔/ μm	测量光谱 相对分布/%	AMI. 5A 级匹配 范围/%	匹配 情况
0.4~0.5	21.18	14.8~22.2	匹配
0.5~0.6	22.24	16.08~24.12	匹配
0.6~0.7	21.13	14.64~21.96	匹配
0.7~0.8	12.74	11.84~17.76	匹配
0.8~0.9	9.73	9.68~14.52	匹配
0.9~1.1	12.98	12.88~19.32	匹配

3.3 日地位置调节系统校准

根据国军标惯性技术测试设备主要性能研究方法,利用经纬仪与23面体对多维工作台分辨率及定位精度进行测试^[22-23],从被测轴角位置测量系统数字显示0位置起,记下经纬仪读数,以数字显示为准依次使轴转动棱体面规定的角度,记下经纬仪相应读数,经测试日地位置调节系统的横滚与俯仰调整范围分别为0°~180°和-25°~+25°,分辨率和定位精度均为1'。

3.4 定标系统日照时数模拟精度测试与验证

由于模拟对比测试法,不需要考虑误差的随机性,而是把所有误差都看成了系统误差,因此,在任何情况下,定标系统总误差绝对不会超过此方法的测试误差^[24]。因此,利用光电式日照计模拟系统测量定标系统的实际日照时数,与定标系统理论日照时数对比,从而得出日照时数的模拟误差。

调节直接辐射模拟系统与散射辐射模拟系统的辐照度,使得光电式日照计模拟系统测得的太阳直接辐射辐照度从 $100 \sim 150 \text{ W/m}^2$ 的每隔 30 min 进行更迭,并在 480 min 内间隔 1 min 采样,其测试结果如图 10 所示。

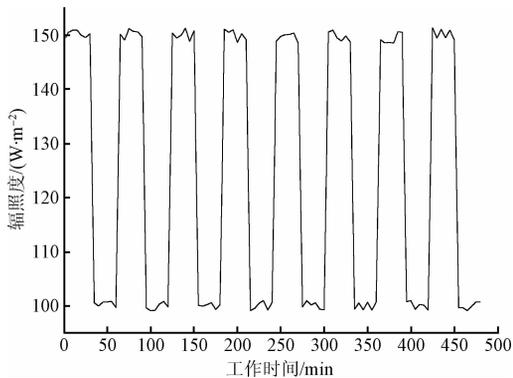


图 10 日照时数模拟误差

Fig. 10 Simulation error of sunshine hours

480 min 内的理论日照时数应为 240 min,实际日照时数为 249 min,故光电式日照计定标系统 480 min 内的日照时数模拟误差为 3.75%,满足光电式日照计定标需求。

4 结 论

结合光电式日照计工作原理,提出了一种光电式日照计的定标新方法,通过对太阳直接辐射和散射辐射分布以及日地关系变化的模拟,实现了光电式日照计室内定标。介绍了定标系统总体设计方案,分析研究了直接辐射模拟系统、散射辐射模拟系统以及日地位置调节系统的主要技术指标,提出了定标系统的校准方法并建立相应的校准链,制定了校准链中各步骤的校准方法,设计实验验证了光电式日照计的日照时数的模拟误差。结果表明:光电式日照计定标系统满足对光电式日照计的定标要求。

参考文献

[1] 刘娜,任芝花,余予. 直接辐射表与日照计观测日照时数的差异评估[J]. 气象,2015,41(1):68-75.
LIU N, REN ZH H, YU Y. Comparative evaluation of sunshine duration observations by pyrheliometer and operational sunshine recorders [J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(1): 68-75.

[2] 赵晓莉,苑跃,黄晓龙,等. 温江站日照计与直接辐射表观测日照时数差异分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(4): 81-84.
ZHAO X L, FAN Y, HUANG X L, et al. Difference and correlation analysis of sunshine duration between sunshine recorder and pyrheliometer [J]. Plateau and Mountain

Meteorology Research, 2015, 35(4): 81-84.

- [3] 孟庆勇,次仁德吉,旺堆. DZZ5 新型自动站直射表日照观测与人工观测对比[J]. 气象科技,2015,43(3): 417-421.
MENG Q Y, CIREN D J, WANG D. Comparison analysis of actinometer measurements from new-type DZZ5 automatic meteorological station at nyingchi [J]. Meteorological Science and Technology, 2015, 43(3): 417-421.
- [4] 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.
LV 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.
- [5] 王炳忠,丁蕾,杨云. 关于光电型总日射表光谱性能的研究[J]. 太阳能学报,2012,33(12):2122-2126.
WANG B ZH, DING L, YANG Y. Spectral characteristics of photovoltaic pyranometer [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2012, 33(12): 2122-2126.
- [6] 袁春生. 光电型数字日照计技术的研究[D]. 长春:长春理工大学,2016.
YUAN CH SH. Research on the technology of photoelectric digital sunshine recorder [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [7] 国家气象局气候监测应用管理司. 气象仪器和观测方法指南[M]. 北京:气象出版社,1992.
Department of climate monitoring applications, national weather service. Guide to meteorological instruments and methods of observation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1992.
- [8] 张健,张国玉,孙高飞,等. 校准能见度仪用标准散射体定标系统装调技术[J]. 仪器仪表学报,2017,38(5):1207-1215.
ZHANG J, ZHANG G Y, SUN G F, et al. Alignment technology for standard scatter plate calibration system used in calibrating forward scattering visibility meter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1207-1215.
- [9] WMO G E. WMO guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO-No. 8 [S]. Secretariat of the World Meteorological Organization, 1983.
- [10] 赵世军,刘西川,高太长. 日照计发展现状及前景分析[J]. 气象水文海洋仪器,2011,28(2):96-99.
ZHAO SH J, LIU X CH, GAO T CH. Current situation and prospect analysis for sunshine recorder [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2011, 28(2): 96-99.

- [11] 王家骐,金光,颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device[J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(2):105-116.
- [12] 李枝玖. 太阳能光伏电站自动跟踪系统的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2011.
LI ZH J. Research on the tracking system of photovoltaic power plant [J]. Baoding: North China Electric Power University, 2011.
- [13] 姚万祥,李峥嵘,李翠,等. 各种天气状况下太阳辐射照度与太阳光照度关系[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013,41(5):784-787.
YAO W X, LI ZH R, LI C, et al. Relationship between solar radiance and solar illuminance under all sky types[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013,41(5):784-787.
- [14] 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.
LIU SH. Study on key technique of collimation solar simulator with high-precision [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [15] 杜景龙,唐大伟,黄湘. 太阳模拟器的研究概况及发展趋势[J]. 太阳能学报, 2012(增刊1):70-76.
DU J L, TANG D W, HUANG X. Research status and future development of solar simulator[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012(Suppl. 1):70-76.
- [16] FINKEL M W. Integrating sphere theory [J]. Optical Communication, 1970,2(1):25-28.
- [17] 岑建, 骆清铭, 朱苒, 等. 基于单片机的双积分球组织光学特性参数测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(2):187-190.
CEN J, LUO Q M, ZHU D. A double-integrating-sphere system for measuring the optical properties of tissue based on single-chip microcomputer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(2):187-190.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 2410-2008 透明塑料透光率和雾度的测定[S]. 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision. GB/T 2410-2008 Determination of the luminous transmittance and haze of transparent plastics[S]. Standards Press of China, 2008.
- [19] 王国安,米涛涛,邓天宏,等. 太阳高度角和日出日落时刻太阳方位角一年变化范围的计算[J]. 气象与环境科学, 2007,30(增刊1):161-164.
WANG G AN, MI H T, DENG T H, et al. Calculation of the change range of the sun high angle and the azimuth of sunrise and sunset in one year[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2007,30(Suppl. 1):161-164.
- [20] 贾建援,柴伟,于大林,等. 方位俯仰转台误差参数辨识与指向精度分析[J]. 仪器仪表学报, 2016,37(7): 1500-1508.
JIA J Y, CHAI W, YU D L, et al. Error parameters identification and pointing accuracy analysis of an azimuth-elevation turntable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(7):1500-1508.
- [21] 吕文华,边泽强,崇伟,等. 直接辐射表性能测试研究[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(增刊1):19-24.
LV W H, BIAN Z Q, CHONG W, et al. Research on performance testing of pyr heliometers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (Suppl. 1): 19-24.
- [22] 国防科学技术工业委员会. GJB 1801-93 惯性技术测试设备主要性能试验方法[S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 1993.
COSTIND. GJB 1801-93 Testing methos of major performance for test equipments of inertial technology[S]. Beijing: COSTIND, 1993.
- [23] 杜璧秀,米阳,张淑梅. 变结构控制在高精度转台系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 68-71.
DU B X, MI Y, ZHANG SH M. Application of variable structure control for high precision turntable[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(9): 68-71.
- [24] 马宏,王金波. 仪器精度理论[M]北京:北京航空航天大学出版社, 2009.
MA H, WANG J B. Theory of instrument accuracy[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009.

作者简介



杨俊杰 (通讯作者), 2015 年于长春理工大学获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要研究方向为气象仪器。

E-mail: 545293714@qq.com

Yang Junjie (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2015.

Now she is a master student in Changchun University of Science and Technology. Her main research interest includes meteorological instruments.



张国玉, 2005 年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究工作。

Email: zh_guoyu@163.com

Zhang Guoyu received his Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology (CUST) in 2005. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in CUST. His main research interest include space science and technology, photoelectric instrument and measurement technique, and etc.