

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413283

光电式日照计测量误差不确定性仿真分析*

郑慧程¹, 王凌云¹, 李光茜², 张玮彤¹, 庞成伟¹

(1. 长春理工大学光电工程学院 长春 130022; 2. 长春大学电子信息工程学院 长春 130022)

摘要:光电式日照计在晴天和多云等天气状况下测量散射辐射时因受其遮光设计的影响,结果可能会出现较大误差。为减小其测量误差,通过 TracePro 仿真分析四、六、八分遮光方案在不同天气下的反射直射辐射误差以及散射分布误差,得出尽管六分和八分遮光方案能更好细分探测天穹,但其遮光孔数量的增加会致使散射分布误差的修正难度增大。故本文针对四分遮光方案建立了散射分布误差修正模型,并通过模拟及实测验证了其有效性。修正后,总辐射传感器接收的散射辐射与散射传感器测量的辐射相关性显著提高, Pearson 相关系数均在 0.95 以上,平均相对误差降低至 4% 以下。在实际测试中,光电式日照计的月累计误差由 12.25% 减少到了 2.66%,测量精度得到了大幅提升。

关键词: 光电式日照计;遮光方案;反射直接辐射误差;散射分布误差;修正模型

中图分类号: TH765.22 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Simulation analysis of measurement error uncertainty of photoelectric insolation meter

Zheng Huicheng¹, Wang Lingyun¹, Li Guangxi², Zhang Weitong¹, Pang Chengwei¹

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: Photoelectric insolation meter may experience significant errors when measuring scattered radiation under sunny and cloudy weather conditions due to their shading design. To reduce the measurement errors, the reflection direct radiation error and diffuse distribution error of the four-, six-, and eight-divided shading schemes under different weather conditions are analyzed using TracePro simulation. The analysis concludes that although the six- and eight-divided shading scheme can capture the dome of the sky more effectively, increasing the number of the shading holes makes it more difficult to correct the diffuse distribution error. Consequently, this paper establishes a diffuse distribution error correction model for the four-divided shading scheme and verifies its validity through simulation and actual measurement. After the correction, the correlation between the scattered radiation received by the total radiation sensor and the radiation measured by the scattering sensor is significantly improved, with the Pearson correlation coefficients above 0.95, and the average relative error reduced to below 4%. In the actual test, the monthly cumulative error of the photoelectric heliometer was reduced from 12.25% to 2.66%, significantly enhancing measurement accuracy.

Keywords: photoelectric insolation meter; shading scheme; reflected direct radiation error; diffuse distribution error; correction model

0 引言

太阳辐射是衡量地区热平衡的重要物理因素。根据世界气象组织(world meteorological organization, WMO),给定时段内的日照时数定义为直接太阳辐射度超过 120 W/m^2 的各分时段时间的总和^[1-3]。其广泛应用于农

业生产、建筑设计、太阳能发电、旅游参考等领域。

自 2018 年开始,我国气象部门日照时数观测逐步由人工观测的暗筒式日照计换型为全自动的光电式数字日照计,相较于暗筒式日照计它具有结构简单,环境适应性好,稳定可靠的优点^[4-5]。基于总辐射测量法的光电式日照计,有多种遮光方案设计。荷兰 Kipp&Zonen 公司研制的 CSD 系列日照计以及天津中环天仪公司生产的 DFC3

收稿日期:2024-09-15 Received Date: 2024-09-15

* 基金项目:吉林省科技发展计划重点研发项目(20220201089GX)资助

光电式自动日照计两者的日照传感器均为四分遮光方案设计,在国际范围内,此设计应用较为广泛^[6]。无锡所的DFC1型光电式数字日照计采用的FS-RZ1日照传感器为八分遮光方案设计,其月总量误差整体偏大,且在多云、阴雨天下的测量误差较大^[7]。江苏省无线电科学研究所设计了一种高精度日照传感器及其测量装置,其日照传感器的入窗口有4、6、8个,能对探测天穹进行更好的细分和平均较大程度的改善多云和半阴天气象条件下的日照时数测量精度,但其只对其中一种结构进行了测试^[8]。

根据日照计性能测试数据,部分日照计在晴天、阴天、雨天等天气下都存在有数据记录偏差大的问题,这主要是由于散射辐射测量误差导致的响应不确定性^[9]。到达地面的太阳辐射会随时间、季节、天气状况等因素的变化而变化^[10]。此外日照传感器测得的辐射数据总是包含太阳直接辐射和散射辐射。因此,无法对其中某一类辐射进行独立的定量分析。

为更直观的分析光电式日照计日照传感器各个辐射探测器件的辐射接收情况,进一步提升日照计的精度及性能,本文通过使用TracePro软件的Solar Emulator组件,根据2019—2022年长春的太阳辐射数据,模拟太阳的直接辐射与散射辐射,根据日照传感器各个辐射探测器件的辐射情况对影响日照计部分测量误差的不确定性进行分析。

1 光电式日照计工作原理

光电式日照计获得日照时数数据依托的总辐射测量法是基于直接太阳辐射(I)与太阳总辐射(G)和散射太阳辐射(D)之间的基本关系:

$$I = G - D \quad (1)$$

我国各级台站使用的光电式日照计多为基于总辐射测量法的四等分窗口的遮光方案,其结构如图1(a)所示。光电传感器由3个同轴排列且特性相同的光电感应器件组成,其中光电传感器1(D1)在360°环形范围内接收总辐射。光电传感器2(D2)和光电传感器3(D3)接收同一时刻环形范围内不同方向的辐射,上下两层四等分窗口遮光方案使太阳直接辐射只能照射到D2、D3中的一只,其中较小的输出值为散射辐射。直接辐射为总辐射与散射辐射之差,累计直接辐照度大于120 W/m²的时间得到日照时数。

不同遮光方案设计使光电传感器2(D2)和光电传感器3(D3)接收散射方向、范围不同,直接影响了D2、D3接收辐射能量情况。六分、八分窗口的遮光方案分别在遮光筒D2、D3周围各开3、4个入射窗,如图1(b)与(c)所示。上下两层相互配合,交错分割探测天穹,将天穹细分为6个区域、8个区域。

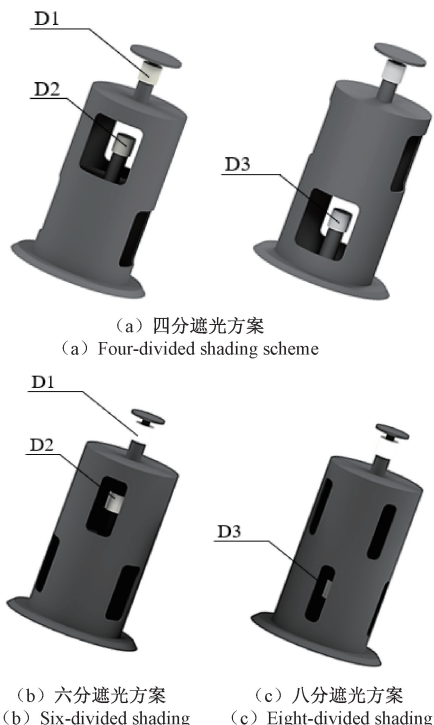


图1 3种遮光方案结构

Fig. 1 Structural diagram of three shading scheme

2 影响测量误差分析

光电式日照计的测量误差可能由多种因素引起,例如光电器件的光谱误差、余弦校正器的表面粗糙度、光电器件的老化、采集电路的温度漂移等。对于这些误差,已有较多研究或可以通过实验方法进行修正^[11-12]。然而,散射传感器接收到的反射直接辐射误差和散射分布误差这两种因素由于其复杂性,难以通过实测手段直接分析,传统实验方法难以有效识别和量化其影响。

为了克服传统实验手段的局限性,采用仿真手段对这两种误差进行深入研究。旨在通过虚拟环境下的模拟分析,揭示其对光电式日照计散射辐射测量的影响机制,从而为仪器设计优化和测量精度提升提供依据。具体而言,在TracePro中导入四分、六分、八分遮光方案模型,设置地点为长春(44°N,126°E),并利用Solar Emulator组件设定太阳位置和天空亮度分布,模拟不同日期和天气状况,记录D1、D2、D3的辐照度并进行分析。

2.1 反射直接辐射误差

在散射辐射的测量中,为隔绝太阳直接辐射,光电式日照计采用遮光筒的设计方案,但是由于日照计遮光筒吸光漆的吸光率不能达到100%,部分太阳直接辐射会经由遮光孔,通过遮光筒内壁的反射,最终照射到散射传感器D2、D3上,造成反射直接辐射误差。

遮光筒的黑漆散射特性等效为朗伯体,设置黑漆的吸收率为 90%^[13]。设置太阳直接辐射属性后进行光线追迹,筛选出经由遮光筒内壁反射后照射到散射传感器的光线。3 种不同窗口遮光方案散射传感器(D2/D3)接收到的反射直接辐射误差如图 2 所示。

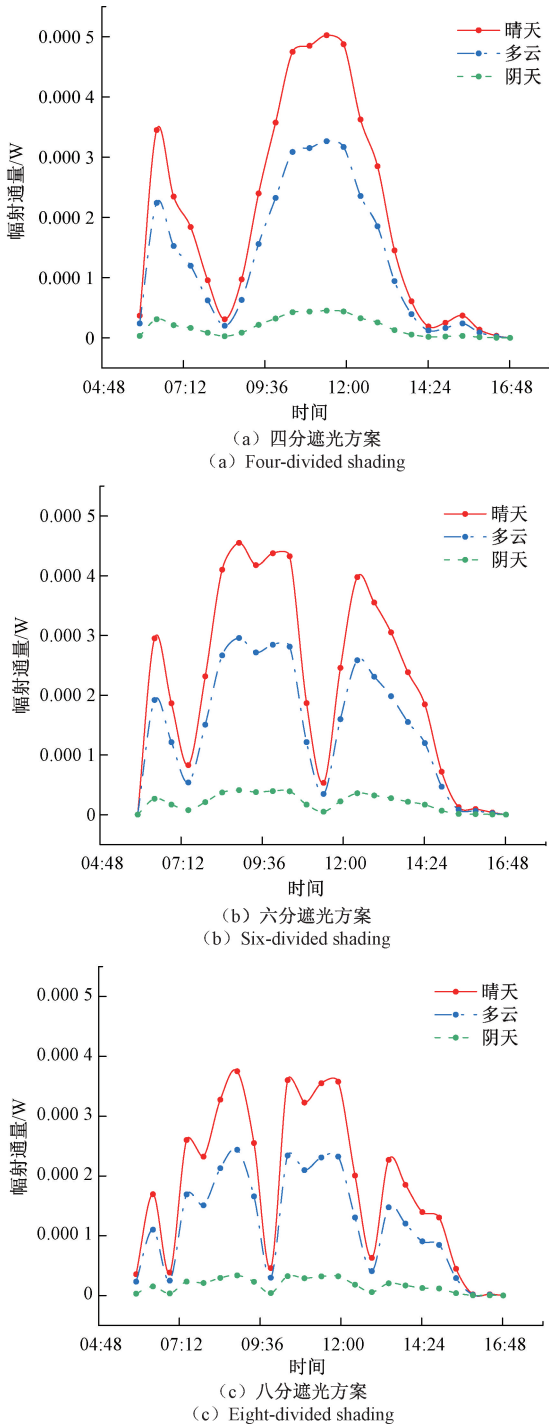


图 2 3 种窗口遮光方案散射传感器接收反射直接辐射
 Fig. 2 Three shading schemes scatter sensors receive reflected direct radiation

从图 2 中可以看出,晴天条件下反射辐射误差最高,且在一天中随时间呈现出明显的峰值变化。随着遮光孔数量增加,反射直接辐射误差波动频率增加,这表明遮光设计对反射辐射误差具有较高的敏感性。而在阴天条件下,反射辐射误差接近于零,几乎不受时间和遮光方案的影响。

以四分遮光方案为例,反射的直接辐射随太阳位置与遮光口的关系变化如图 3 所示。清晨太阳位于 *a* 点时,D2 几乎接收不到反射的直接辐射。随着太阳从 *a* 移动到 *b*,太阳辐射通过通光孔①反射至 D2,反射误差逐渐减小,至 *b* 点时几乎完全被遮挡。当太阳从 *b* 移动到 *c* 时,辐射通过通光孔②反射至 D2,随着辐射增大,反射误差达到最大。下午同理,反射直接辐射误差随太阳位置变化呈对称性变化。

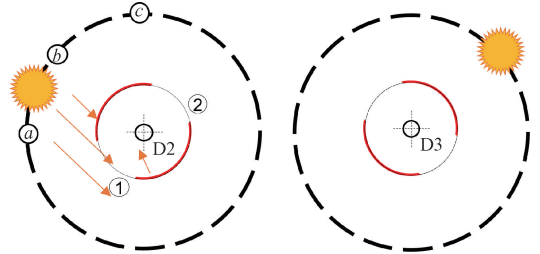


图 3 散射传感器接收太阳直接辐射
 Fig. 3 Schematic diagram of scatter sensor receives direct solar radiation

3 种遮光方案散射传感器接收反射直接辐射的大小随着不同遮光方案下太阳位置与遮光口的遮挡关系的变化而变化。天气状况为晴天时,太阳直接辐射及其占总辐射比值较大,计算得到散射传感器接收到反射直接辐射最多为接收散射的 5%,在多云及阴天天气状况下这个比值会进一步降低。在实际设计使用中,可选择国产黑漆 SR107-S731 (SB-3)、ERB-2B、SH-96 等、美国的 Aeroglaze® Z 306 黑漆和 3M 公司的 velvet 黑漆等^[14],这些吸光漆的吸收率都高于 94%,其性能优于本仿真中使用的黑漆。因此,散射传感器接收到的反射直接辐射误差对测量结果的影响较小,尤其是在多云和阴天的情况下,其影响可以忽略不计。本文接下来将重点分析散射分布误差对测量精度的影响。

2.2 散射分布误差

一般情况下,太阳直射辐射是由视场角约为 5° 的仪器(直接辐射表)测定,而日面本身的视场角仅约为 0.5°,因此直接辐射包括日面周围的部分散射辐射^[15]。若天空云量分布均匀,在环形区域以外,散射辐射在半球天空中会以太阳所在环形天空为圆心,随距离太阳的远近呈圆周状对称分布^[16];在一定范围内,散射辐射随着离太阳的距离增加而减少,在不同天气状况下,散射辐射

减小的程度随之变化。在这个范围以外,天穹各部分散射辐射分布均匀。地面特定平面法线方向与太阳辐射方向的夹角,记为夹角 σ 。夹角 $\sigma < 90^\circ$ 时,特定平面接收散射辐射占半球天空散射辐射比值随着与太阳之间夹角 σ 的增大而迅速减小,夹角 $> 90^\circ$ 时,变化幅度较小,天穹中大部分区域更接近于各向同性^[17]。

对3种遮光方案设计的日照传感器在不同天气状况下进行仿真模拟,设置晴天、多云、阴天3种天气状况下的天穹散射辐射分布如图4(图示显示太阳在2023年10月16日12:55的位置状况)所示。

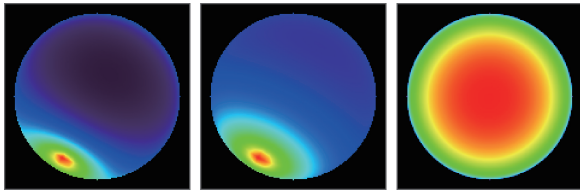


图4 天穹散射辐射

Fig. 4 Schematic diagram of sky diffuse radiation

在晴天、多云、阴天3种天气状况下,3种遮光设计方案总辐射传感器接收散射以及散射传感器测量辐射能量情况如图5所示。

由图5可以看出,总辐射传感器接收散射以及散射传感器测量辐射随着太阳高度角的增大而增大,并在当地正午(11:21)时达到最大值。其中在图5(a)与(b)中,散射传感器测量散射与总辐射传感器接收的散射辐射相比,四分、六分和八分散射传感器在不同时间段存在异常增大的现象,具体时间段和峰值总结如表1所示。

表1 3种遮光方案测量散射异常时段及其峰值时刻

Table 1 Three shading schemes to measure scattering anomaly periods and their peak moments

遮光方案	散射异常增大时段	峰值时刻
四分方案	09:00~14:00	11:21
	06:30~07:50	07:10
六分方案	09:30~13:30	11:21
	14:50~16:20	15:40
八分方案	07:30~14:30	09:00
		14:30

整体来看,散射传感器的辐射测量曲线呈现出上午、下午对称的变化趋势。随着天气状况的变化,在图5(b)多云天气时,散射传感器的测量变化较为平稳,与总辐射传感器接收到的散射差异减小。在图5(c)阴天条件下,散射传感器与总辐射传感器的测量结果几乎相同。

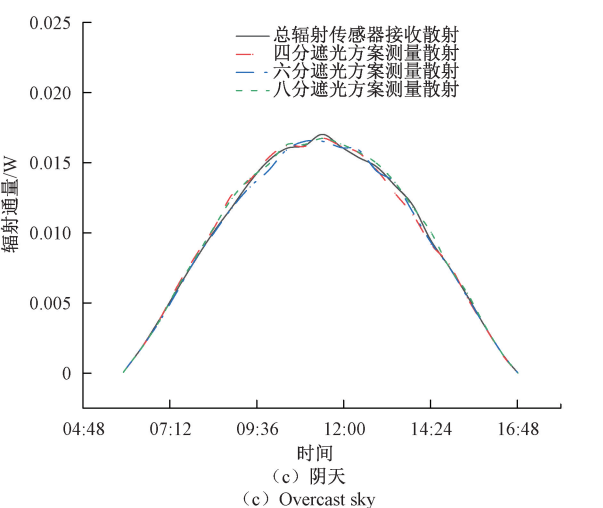
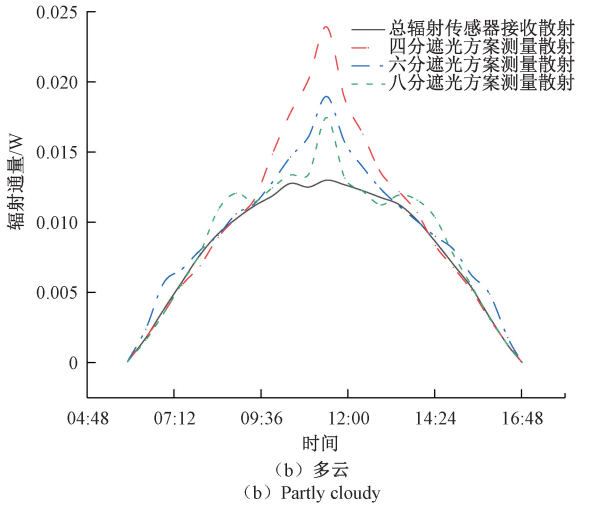
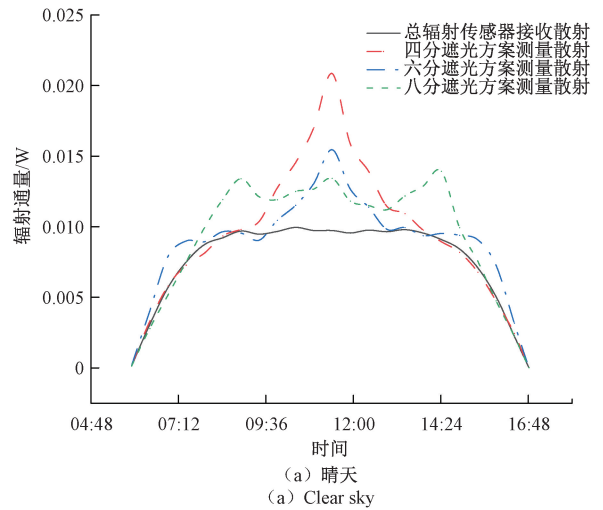


图5 3种遮光方案各传感器接收散射情况

Fig. 5 Received scattering by each sensor for three shading schemes

3种遮光方案散射传感器测量辐射反常峰值时刻与切换探测散射辐射传感器时刻密切相关,上述数据所设

定日期的 3 种遮光方案散射数据选用散射探测器件情况如表 2 所示。

表 2 3 种遮光方案散射数据散射探测器件选用情况

Table 2 Scattering data scattering detector pieces for three shading schemes

开始时间戳	四分方案	六分方案	八分方案
05:55	D2	D3	D3
07:25	D2	D2	D3
08:55	D2	D2	D2
11:21	D3	D3	D3
14:55	D3	D3	D2
15:40	D3	D2	D2

可以发现 3 种遮光方案散射传感器测量辐射反常峰值时刻与切换探测散射辐射传感器时刻相吻合,散射分布误差发生在切换探测散射辐射传感器前后。

由于日照计的位置是固定的,散射传感器通过遮光筒上的通光孔检测的天空区域也固定不变,但太阳的位置则随时间变化。四分遮光方案日照传感器探测天穹辐射如图 6 所示。

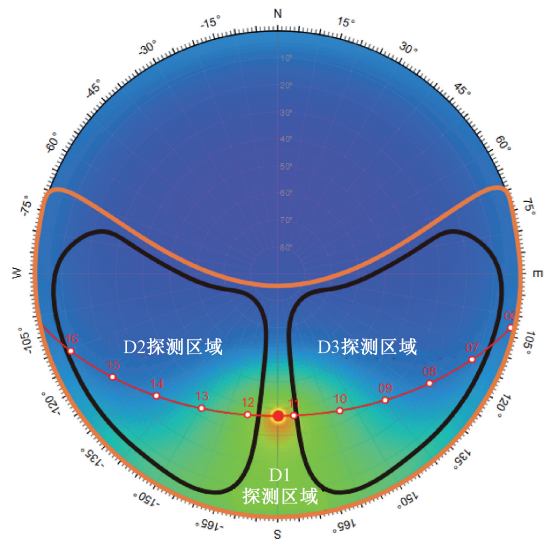


图 6 四分遮光方案探测天穹辐射

Fig. 6 Schematic of four-divided shading scheme for detecting radiation from the sky dome

在晴天或多云情况下,上午 D2 区域探测的散射辐射占 D1 探测散射的比重逐渐增加,下午 D3 区域比重逐渐减少,最后导致 09:00—14:00 期间散射传感器测得辐射值偏高,直接辐射值偏低。对于六分和八分遮光方案, D2 和 D3 探测区域相互交错分布,散射传感器切换次数增多,散射分布误差时段随即增多。在阴天条件下,整个

天穹的散射辐射较为均匀,3 种遮光方案都不会引起散射分布误差。

散射传感器探测到的散射辐射会因部分天气状况下不均匀的天穹散射空间分布与通光孔的位置相互影响而造成的散射分布误差,且散射分布误差发生在切换探测散射辐射传感器前后。随着不同遮光方案设计通光孔的增多,相应散射分布误差时段随着切换探测散射辐射传感器次数增多随即增多。

3 四分遮光方案散射分布误差修正

3.1 散射分布误差模型的建立

根据上文分析,六分、八分遮光方案多通光孔的设置,导致这两种设计方案散射传感器接收散射分布误差区域增多,鲁棒性较差,难以对其散射分布误差进行修正。因此本文选用四分遮光方案设计对其散射分布误差进行修正。

四分遮光方案的散射分布误差发生在其切换探测散射辐射传感器前后时段,一般在当地正午前后 2.5~3 h 左右,具体时间与太阳的视运动紧密相关。

太阳的视运动随季节变化,主要归结于两个因素:

1) 地球的自转轴相对于它的黄道面倾斜了约 23.5°,一年中,太阳在天空中的位置相应时刻规律变化。正午时,太阳在夏至时最高,在冬至时最低。夏至时,北半球的白天最长,冬至时,北半球的白天最短。

2) 地球绕太阳的轨道是椭圆形的,太阳位于椭圆轨道一个焦点上,根据开普勒定律,地球在近日点时移动得更快,真太阳日变短。在远日点时移动得更慢,真太阳日变长^[18]。

长春位于东八区,以北京时间(平太阳时)为例,当地正午时间在一年中会从 2 月中旬的 11:50 到 11 月初的 11:20 之间变化,最大偏移时间约 30 min。使用真太阳时可避免均时差造成的影响。

真太阳时 (AST) 和平太阳时 (MST) 的关系可以表示为:

$$AST = MST + \Delta t \quad (2)$$

其中, Δt 为当天的时间方程,可由下式求出。

$$\Delta t = 0.0028 - 1.9857 \sin \theta + 9.9059 \sin 2\theta - 7.0924 \cos \theta - 0.6882 \cos 2\theta \quad (3)$$

其中, θ 为日角,计算公式为:

$$\theta = \frac{2\pi t}{365.2422} \quad (4)$$

其中, t 为修正积日,由两部分组成:

$$t = N - N_0 \quad (5)$$

其中, N 为年积日,是一年中从 1 月 1 日开始算起的第 N 天,如平年的 2 月 1 日, N 的值为 32。平年、闰年

的12月31日 N 分别为 365、366。 N_0 由下式表达。

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422(Y - 1985) - \text{INT}\left(\frac{Y - 1985}{4}\right) \quad (6)$$

其中, Y 为年份, 其式是以 1985 年为基准年建立的公式^[19]。

散射分布误差的持续时间随季节变化, 在一年中的夏至日, 散射分布误差持续时间最长, 约为当地正午前后 3 h; 冬至时, 散射分布误差持续时间最短, 约为当地正午前后 2.5 h。为便于分析研究, 将散射分布误差的发生时间转化为基于地平坐标系表征太阳位置的方位角与高度角。夏至日时, 太阳在一年中的太阳高度角最大, 太阳方位角在 $110^\circ \sim 250^\circ$ 时发生散射分布误差; 随着正午太阳高度角的降低, 发生散射分布误差的太阳方位角范围逐渐减小, 向 180° 收拢, 在冬至时, 发生散射分布误差的太阳方位角范围最小为 $135^\circ \sim 225^\circ$ 。太阳方位角是从观察者所在位置正北方向开始, 沿水平方向顺时针度量到太阳的夹角。取值范围从 $0^\circ \sim 360^\circ$, 北方为 0° , 东方为 90° , 南方为 180° , 西方为 270° 。太阳方位角计算如下:

$$\sin \phi_s = \frac{-\sin \omega \cos \delta}{\cos \theta_s} \quad (7)$$

其中, ϕ_s 是太阳的方位角, θ_s 是太阳高度角, ω 是计算时间的时角, δ 是当时的太阳赤纬。

太阳高度角为太阳光入射方向和地平面的夹角。计算方式如下:

$$\sin \theta_s = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos \omega \quad (8)$$

其中, Φ 为当地纬度。

赤纬角 δ 是赤道平面与太阳和地心连线的夹角, 计算太阳赤纬角如式(9)所示。

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284 + N}{365}\right) \quad (9)$$

太阳时角 ω 是地球自转时所在时圈与通过正南方时圈之间的夹角, 公式如式(10)所示。

$$\omega = (AST - 12) \times 15^\circ \quad (10)$$

根据不同日期、天气状况散射数据, 对其散射分布误差 Δ_D 进行拟合, 部分误差拟合如图 7 所示。

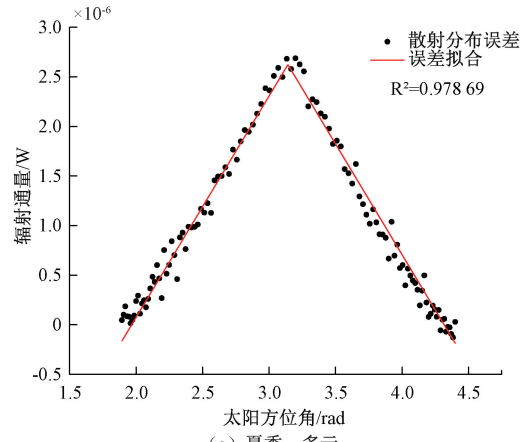
根据对散射分布误差的分析, 数据满足线性关系, 误差模型公式如下:

$$f(x) = -A \left| x - \frac{\pi}{2} \right| + B \quad f(x) \geq 0 \quad (11)$$

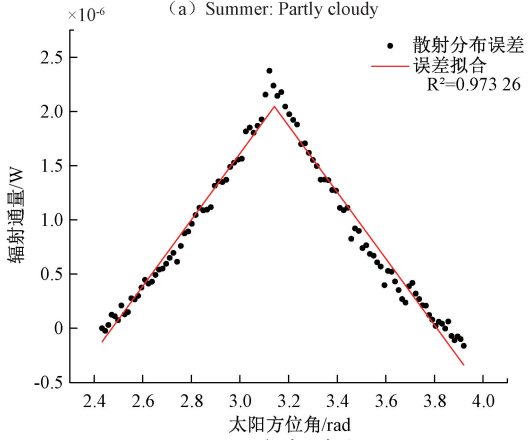
对散射传感器测量辐射的散射分布误差进行修正, 修正模型为:

$$f(x) = mE_D + A \left| x - \frac{\pi}{2} \right| - B \quad (12)$$

其中, mE_D 为散射传感器测量辐射, A 为散射分布系数, 与散射分布误差开始时段直接辐照度有关, 直接辐



(a) Summer: Partly cloudy



(b) Winter: Clear sky

图7 散射分布误差拟合

Fig. 7 Diffuse distribution error fitting

照度越大 A 值越大, 实际测量中 A 可由式(13)求出。

$$A = k |E_{D2} - E_{D3}| \quad (13)$$

其中, E_{D2} 、 E_{D3} 为 D2、D3 探测到的辐射值。 $|E_{D2} - E_{D3}|$ 越小, 散射分布误差偏差越小, 在阴天情况下天空散射辐射均匀变化, E_{D2} 、 E_{D3} 探测到的辐照的几乎相等, 这时 $A \approx 0$ 不进行散射分布误差修正。 k 值由实测得出。

B 为区间系数, 决定测量到的散射分布误差开始及结束时段, B 越大散射分布误差时间越短。 θ_n 为正午太阳高度角, 单位为弧度。在一年中, 夏至日当天的正午高度角最大, 散射分布误差持续时段最长。 B 可由式(14)表达。

$$B = k \times \frac{-6.4808\theta_n + 24.68}{10^{-7}} \quad (14)$$

综上, 误差修正模型公式如下:

$$f(x) = mE_D + k \left(|E_{D2} - E_{D3}| \times \left| x - \frac{\pi}{2} \right| + \frac{6.4808\theta_n - 24.68}{10^{-7}} \right) \quad (15)$$

3.2 散射分布误差的修正

模拟长春 2023 年间的辐射, 使用散射分布误差修正

模型对散射传感器接收辐射进行修正,修正后部分天气总辐射传感器接收散射辐射与散射传感器测量辐射结果如图 8 所示。

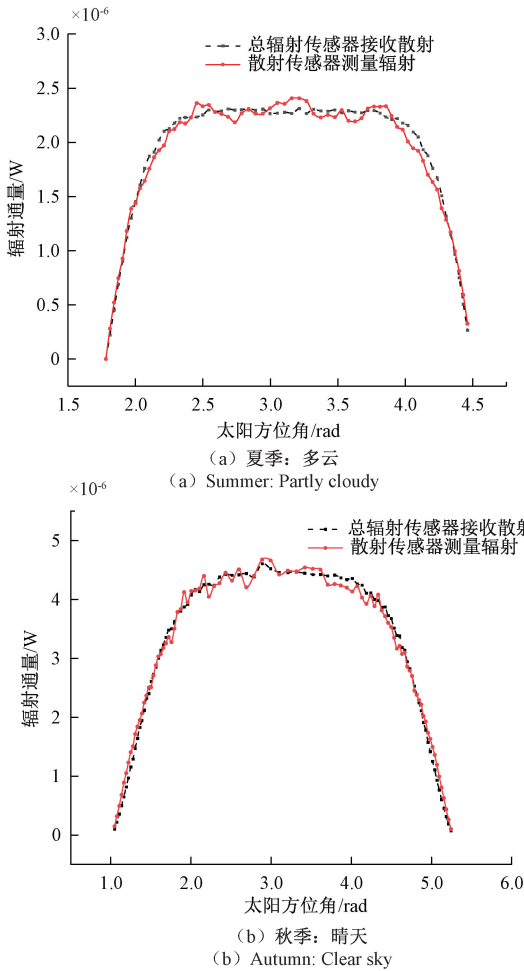


图 8 修正后的散射传感器测量辐射与总辐射传感器接收散射辐射

Fig. 8 Corrected scatter sensor measured radiation and total radiation sensor received scattered radiation

可以看出,经过模型修正后,在上述天气状况下总辐射传感器接收散射辐射与散射传感器测量辐射近似相同,修正后的 Pearson 相关系数(pearson product-moment correlation coefficient, PPMCC)分别达到 0.967 和 0.961; 散射分布误差发生时段的平均相对误差(mean absolute percentage error, MAPE)则从 37.8% 和 22.05% 降低至 2.72% 和 2.36%。

此外,在模拟的国际照明委员会(commission internationale de l'éclairage, CIE)标准下的 15 种类型的天空条件^[20-21](从阴天到万里无云,以及不同程度的阳光直射)下,使用散射分布误差修正模型修正后的日照计总辐射传感器接收散射辐射与散射传感器测量辐射之间的 Pearson 相关系数均在 0.95 以上,散射分布误差发生时

段的 MAPE 均低于 4%,表明修正效果良好。修正评价如表 3 所示。

表 3 散射分布误差修正评价(15 种 CIE 标准通用天空模型)
Table 3 Evaluation of diffuse distribution error correction (15 CIE standard general sky models)

亮度分布说明	PPMCC	MAPE/%
CIE 标准阴天天空,亮度色调急剧变化,接近天顶,方位角一致	0.981	2.53
阴天,亮度色调急剧变化,并稍微发亮,接近太阳	0.973	3.01
阴天,适度渐次变化,方位角一致	0.983	2.39
阴天,适度渐次变化,稍微发亮,接近太阳	0.971	2.93
均匀亮度天空	0.985	2.13
局部多云天空,无色调接近天顶,稍微发亮,接近太阳	0.969	2.98
局部多云天空,无色调接近天顶,太阳周围区域更亮	0.961	3.31
局部多云天空,无色调接近天顶,清晰日晷	0.958	3.52
局部多云天空,黯淡无光的太阳	0.973	3.07
局部多云天空,更亮的太阳周围区域	0.963	3.61
白蓝天空,清晰日晷	0.979	2.63
CIE 标准晴天天空,低亮度浑浊	0.971	2.89
CIE 标准晴天天空,大气浑浊	0.977	2.98
无云浑浊天空,完全日晷	0.982	2.35
白蓝浑浊天空,完全日晷	0.961	2.67

4 测试验证

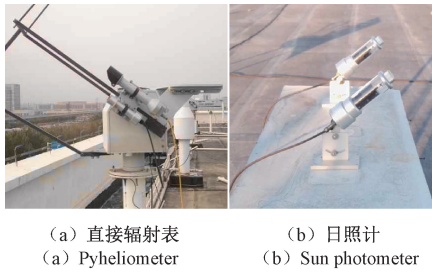
使用日照时数比较法在户外对修正前和修正后的日照计进行测试^[22-23]。TBS-2-B 型直接辐射表不确定度为 1%,可作为检定光电式日照计的标准表,将其安装在全自动太阳追踪器上,与待测日照计同步记录日照时数。比较结果 q 如式(16)所示。

$$q = \frac{\sum_{tot} SD_{ref}}{\sum_{tot} SD_{cal}} \quad (16)$$

其中, $\sum_{tot} SD_{ref}$ 表示给定时间段内标准表日照时数观测结果; $\sum_{tot} SD_{cal}$ 表示给定时间段内待测日照计的日照时数观测结果。

在长春气象仪器测试平台进行测试,测试场地如

图9所示。使用 q_1 、 q_2 分别表示修正前和修正后的比较结果,九月修正前后的测试结果如图10所示。



(a) 直接辐射表
(a) Pyheliometer
(b) 日照计
(b) Sun photometer

图9 日照时数

Fig.9 Sunshine hours test real shot

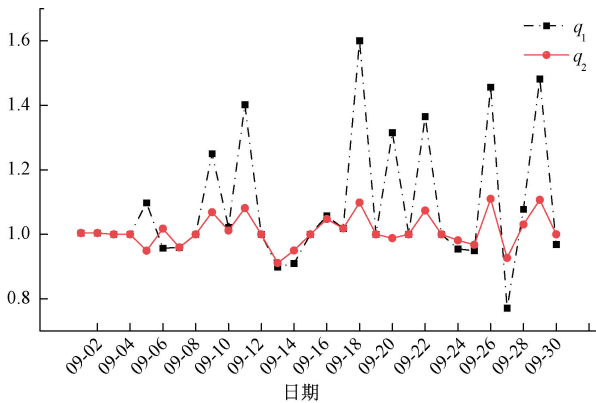


图10 修正前后测试结果对比

Fig.10 Comparison of test results before and after correction

可以看出,修正后的比值较修正前的更接近于1,波动更小,测量结果更加稳定、准确。此外,标准表月累计日照时数为9 124 min,修正前后的光电式日照计月累计日照时数分别为8 006、8 881 min,月累计误差从12.25%减少到了2.66%。通过修正,日照计的误差明显减小,测量精度大幅提升。

5 结 论

为了减少在部分天气条件下散射辐射在天空中的分布不均与遮光筒的遮光设计相互作用而导致的散射分布误差对日照计测量散射辐射的影响,使用TracePro软件,对四分、六分、八分3种遮光设计的日照传感器在不同天气状况下仿真模拟,通过对3种遮光方案下各辐射探测器件(D1、D2、D3)接收辐射的分析,提出了基于四分遮光方案的散射分布误差修正模型。在仿真验证中,修正后的散射传感器测量值与总辐射传感器接收的散射辐射值之间的Pearson相关系数均在0.95以上,表明两者之间的线性相关性极高。同时,在散射分布误差发生时段内,修正模型有效降低了MAPE,在不

同天气条件下,MAPE均控制在4%以内。在实际测试中,月累计误差显著优于未修正前的误差水平,测量结果更加贴近实际。总结而言,本研究提出的修正模型不仅在仿真环境中表现出优异的修正效果,同时也具有较强的实际应用潜力。

参考文献

- [1] WMO. Guide to instruments and methods of observation; WMO-No. 8[S]. Secretariat of the World Meteorological Organization, 2023.
- [2] 林琳,刘譞,康慧玲.一种基于神经网络的天空图像到太阳辐照度的映射模型[J].电子测量技术,2020,43(14):74-78.
LIN L, LIU X, KANG H L. A neural network-based mapping model from sky images to solar irradiance[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(14): 74-78.
- [3] 胡牧,周洁,袁科.基于太阳辐射的光伏电站可靠性模型及算例分析[J].电子测量技术,2019,42(20):28-31.
HU M, ZHOU J, YUAN K. Reliability model and example analysis of photovoltaic power stations based on solar radiation[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20): 28-31.
- [4] 王雨畅,张国玉,孙高飞,等.日照计的研究概况与发展趋势[J].仪器仪表学报,2020,41(12):1-14.
WANG Y CH, ZHANG G Y, SUN G F, et al. Research status and development trends of sunshine recorders[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 1-14.
- [5] 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.
YANG J J, ZHANG G Y, SUN G F, et al. Research on calibration system and calibration method of photoelectric sunshine recorder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2805-2812.
- [6] WANG Y CH, ZHANG G Y, SUN G F, et al. A review on sunshine recorders: Evolution of operation principle and construction[J]. Measurement, 2021, 186: 110138.
- [7] 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.

- LYU W H, CHONG W, DING L. Comparative performance test and analysis of photoelectric automatic sunshine recorders[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(6): 928-933.
- [8] 徐毅刚, 吕文华, 朱庆春, 等. 高精度日照传感器及其测量方法[P]. 江苏省: CN201310186384. 6, 2015-03-25.
- XU Y G, LYU W H, ZHU Q CH, et al. High precision sunshine sensor and its measuring method[P]. *Jiangsu Province: CN201310186384. 6, 2015-03-25.*
- [9] 陆忠涛, 张瑶, 王继梅, 等. 人工与自动日照观测数据对比分析[J]. *黑龙江气象*, 2019, 36(3): 31-32.
- LU ZH T, ZHANG Y, WANG J M, et al. Comparative analysis of manual and automatic sunshine observation data[J]. *Heilongjiang Meteorology*, 2019, 36(3): 31-32.
- [10] 王凌云, 麻跃, 李昊洋, 等. 光电式日照计室内检定中散射辐射模拟方法研究[J]. *光子学报*, 2021, 50(5): 241-248.
- WANG L Y, MA Y, LI H Y, et al. Research on simulation method of scattered radiation in indoor calibration of photoelectric sunshine recorder[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(5): 241-248.
- [11] 赵振东. 光电式数字日照计安装不规范引起的测量误差分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 2021, 38(1): 54-55, 59.
- ZHAO ZH D. Analysis of measurement errors caused by improper installation of photoelectric digital sunshine recorder[J]. *Meteorological, Hydrological and Oceanographic Instruments*, 2021, 38(1): 54-55, 59.
- [12] 崔晓霞. DFC2 光电式数字日照计数据偏差问题研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 2022, 39(1): 74-76.
- CUI X X. Research on the data deviation problem of DFC2 photoelectric digital sunshine recorder[J]. *Meteorological, Hydrological and Oceanographic Instruments*, 2022, 39(1): 74-76.
- [13] 杜伟峰, 王燕清, 姜丽辉, 等. 星敏感器遮光罩检测技术研究(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(9): 55-65.
- DU W F, WANG Y Q, JIANG L H, et al. Research on detection technology of baffle for star sensor (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(9): 55-65.
- [14] 张建贤, 邹永军, 徐蕾, 等. 消光漆在光学系统的国内外应用[J]. *宇航材料工艺*, 2014, 44(6): 88-90.
- ZHANG J X, ZOU Y J, XU L, et al. Application of extinction paint in optical systems at home and abroad[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2014, 44(6): 88-90.
- [15] 中国气象局. 太阳能资源术语: GB/T 31163—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 10.
- China Meteorological Administration. Terminology of solar energy resources: GB/T 31163—2014[S]. Beijing: China Standards Press, 2014: 10.
- [16] 李梦溪. 城市太阳辐射三维分布式矢量模型研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- LI M X. Research on three-dimensional distributed vector model of urban solar radiation [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2024.
- [17] 董宏, 王怡, 李俊锋. 散射辐射在半球天空的分布特征研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(3): 435-440.
- DONG H, WANG Y, LI J F, et al. Study on the distribution characteristics of scattered radiation in hemispherical sky [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 50(3): 435-440.
- [18] KAPLAN G H. The IAU resolutions on astronomical reference systems, time scales, and earth rotation models[J]. *IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems*, 2006: 179.
- [19] 王炳忠, 刘庚山. 日射观测中常用天文参数的再计算[J]. *太阳能学报*, 1991(1): 27-32.
- WANG B ZH, LIU G SH. Recalculation of commonly used astronomical parameters in solar radiation observation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1991(1): 27-32.
- [20] CIE. Spatial distribution of daylight: CIE standard general sky[S]. S011/E:2003.
- [21] 何荣, 米若祎, 吴静, 等. 参考天空分类方法研究综述[J]. *照明工程学报*, 2020, 31(2): 132-137.
- HE X, MI R Y, WU J, et al. A review of research on reference sky classification methods[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2020, 31(2): 132-137.
- [22] 杨俊杰. 光电式日照计定标系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- YANG J J. Research on calibration system of pho-

toelectric sunshine recorder[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.

- [23] 肖汉, 边泽强, 崇伟, 等. 光电式数字日照计校准系统研究[J]. 计量与测试技术, 2024, 51(1): 86-88.
XIAO H, BIAN Z Q, CHONG W, et al. Research on calibration system of photoelectric digital sunshine recorder[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 51(1): 86-88.

作者简介



郑慧程, 2021 年于长春大学获得学士学位, 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: zhc990908@163.com

Zheng Huicheng received his B. Sc. degree from Changchun University in 2021 and is currently a master's student at Changchun University of Science and Technology, His main research interest is meteorological instrumentation.



王凌云 (通信作者), 2009 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。主要研究方向为航天器地面标定技术、光电检测技术。

E-mail: 15004318783@126.com

Wang Lingyun (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology (CUST) in 2009. Now she is a professor and Ph. D. supervisor in CUST. Her main research interests include spacecraft ground calibration technology, optoelectronic detection technology.



李光茜, 2015 年于河北工程大学获得学士学位, 2019 年于长春理工大学获得硕士学位, 2023 年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春大学电子信息工程学院讲师, 主要研究方向为航天器模拟实验与标定技术、光电检测技术。

E-mail: ligq@ccu.edu.cn

Li Guangxi received his B. Sc. degree from Hebei University of Engineering in 2015, M. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2019, and Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology in 2023, and is currently a lecturer at the College of Electronic and Information Engineering of Changchun University, with the main research interests in spacecraft simulation experiments and calibration technology, optoelectronic detection technology.