

高精度旋转遮挡式太阳辐射监测仪设计

徐志安^{1,2} 李 鹏^{1,2} 冯 姣^{1,2} 王 永²

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044; 2. 南京旗云中天科技有限公司 南京 210044)

摘 要: 针对旋转遮光式太阳辐射监测系统采用的硅光电二极管型辐射传感器具有光谱窄、精度低、长期稳定性差的缺点,提出了一种利用热电堆阵列动态校准硅光电二极管阵列的方法,并设计了一款轻量化、低成本、高精度的旋转遮挡式太阳辐射监测装置。该检测系统采用静态过程与动态过程实时交替的方式进行探测,分为静态采集光强大小和动态采集遮光带在旋转的过程中热电堆阵列、硅光电二极管阵列的光强变化,通过计算出太阳高度角和后续数据处理,得到太阳总辐射、直接辐射和散射辐射值。误差分析图显示,总辐射的均方根误差为 1.859 W/m^2 ,直接辐射和散射辐射分别为 2.922 W/m^2 、 2.770 W/m^2 ,相比使用单一硅光电二极管阵列,均方根误差分别降低了 8.908 W/m^2 、 5.454 W/m^2 ,证明该测量方法具备较高的检测精度。

关键词: 热电堆阵列;硅光电二极管阵列;旋转遮挡;辐射采集;太阳高度角

中图分类号: TK513.4;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

High-precision rotary shielding solar radiation monitor design

Xu Zhian^{1,2} Li Peng^{1,2} Feng Jiao^{1,2} Wang Yong²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Qiyun Zhongtian Technology Co., Ltd., Nanjing 210044, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of silicon photodiode type radiation sensor used in rotating shading solar radiation monitoring system, such as narrow spectrum, low precision and poor long-term stability, a method of dynamic calibration of silicon photodiode array using thermopile array is proposed, and a lightweight, low-cost and high-precision rotating shading solar radiation monitoring device is designed. The detection system uses static process and dynamic process to detect in real time alternately. It is divided into static acquisition of light intensity and dynamic acquisition of light intensity changes of thermopile array and silicon photodiode array in the rotating process of the light shield. By calculating the solar altitude angle and subsequent data processing, the value of total solar radiation, direct radiation and scattered radiation can be obtained. The error analysis figure shows that the root mean square error of the total radiation is 1.859 W/m^2 , the direct radiation and the scattered radiation are 2.922 W/m^2 and 2.770 W/m^2 , respectively. Compared with the single silicon photodiode array, the root mean square error is reduced by 8.908 W/m^2 and 5.454 W/m^2 , respectively. It is proved that the measurement method has high detection accuracy.

Keywords: thermopile array; silicon photodiode array; rotating occlusion; radiation acquisition; solar altitude angle

0 引 言

随着全球光伏产业的快速发展,光伏发电^[1]已经成为地球上最具潜力的清洁能源之一。为支撑光伏电站的光资源评估^[2-3]和选址、光功率预报、状态诊断、智慧运维等,需要对太阳总辐射、直接辐射、散射辐射^[4-5]和日照时间等重要太阳辐射参数进行持续准确的监测。

市面上主流的太阳辐射传感器有两种类型,一种为热电堆型^[6],光谱宽、精度高、长期稳定性好,但时间响应速度

慢;另一种为硅光电二极管型^[7],光谱窄、精度低、长期稳定性差,但时间响应速度快。这些技术均无法兼顾高精度、长期稳定和毫秒级快速时间响应的优点。

目前国内外太阳辐射监测系统主要有双轴跟踪式、遮挡环式、旋转遮光式和荫罩式 4 种类型。其中,荷兰 Kipp & Zonen 公司生产的 SOLYS Gear Drive^[8]太阳跟踪器结构复杂,价格高昂,对安装环境有较高的要求,时常出现机械故障而无法对准太阳,需要专人维护;遮挡环式^[9]太阳辐射监测系统结构简单,价格低廉,但在使用过程中,每隔几

天就需要调整一次遮挡环的角度,维护负担重;RSR2 旋转遮光式^[10]太阳辐射监测系统采用硅光电二极管型辐射传感器,光谱测量范围只有 0~1 200 nm,且精度较低,需要频繁人工维护和校准;荫罩式太阳辐射监测系统 SPN1 采用独特的遮阳模式^[11],其内部计算机生成的遮阳罩能够确保不管太阳位置如何,7 个热电堆中总会有一个完全暴露在太阳光束下,另外一个被完全遮住。但是缺点也很明显,由于遮光罩的几何效应,测量误差较大。

针对以上问题,本系统设备采用热电堆阵列和硅光电二极管阵列组合的方式,两者可以独立采集太阳光强信号,热电堆阵列主要负责采集总辐射和校准硅光电二极管阵列的响应误差,硅光电二极管阵列主要负责采集散射辐射毫秒级的变化,交替采集可以有效弥补热电堆响应缓慢和硅基光谱响应范围窄的缺点^[12-14]。该装置在兼顾测量精度的同时,也做到了结构更精简、成本更低、维护方便,能够很好的满足实际应用需求,适合光伏产业大规模部署。

1 系统总体设计思路

如图 1 所示,该辐射监测系统主要由辐射表、伺服电机、遮光带和采样电路组成。

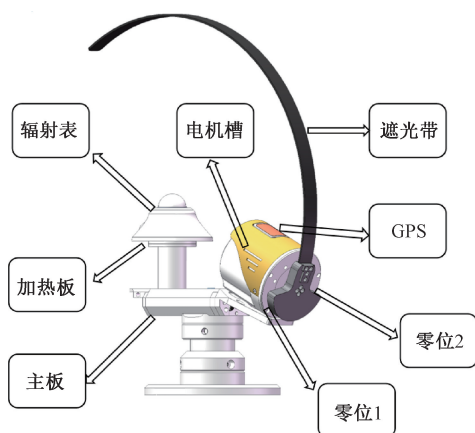


图 1 结构外观图

Fig. 1 Structural appearance drawing

在电机旋转前,遮光带复位至零位 1(或零位 2),此时遮光带未遮挡辐射表,数据采集单元通过辐射表内部的热电堆和硅光电二极管阵列检测当前的瞬时感应电压,并通过式(1)和(2)分别计算总辐射值。

$$R_{TGH} = \frac{V_T}{C_T} \quad (1)$$

$$R_{SGH} = \frac{V_S}{C_S} \quad (2)$$

式中: R_{TGH} 和 R_{SGH} 分别表示热电堆阵列和硅光电二极管阵列检测到的总辐射, V_T 和 V_S 分别表示热电堆阵列和硅光电二极管阵列检测到的感应电压, C_T 和 C_S 分别表示热电堆阵列和硅光电二极管阵列灵敏度系数。

电机启动后会带动遮光带连续扫描 300°(从零位 1 旋

转至零位 2 或者从零位 2 旋转至零位 1),在此过程中,数据采集单元同步按照一定频率采集硅光电二极管阵列检测到的辐射值变化,如图 2 所示,会存在某些时刻辐射表被遮光带完全遮住,此时散射辐射可以表示为:

$$R_{TDHI} = \frac{V_T \cdot V_{Smin}}{C_T \cdot V_S} \quad (3)$$

式中: V_{Smin} 为硅光电二极管阵列测得最小感应电压值, R_{TDHI} 为校准过的散射辐射值。

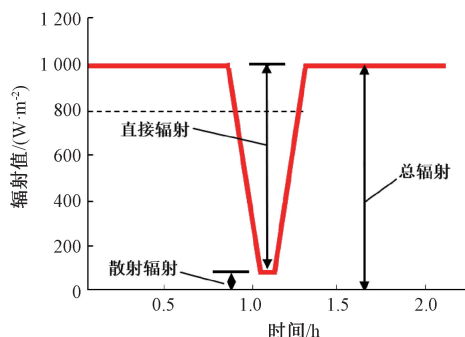


图 2 辐射值随时间变化曲线

Fig. 2 Radiation curve with time

主控单元通过读取 GPS 模块的时间、经纬度来计算出当前时刻的太阳高度角 H_A ^[15], 计算公式如下:

$$H_A = \arcsin(\cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta) \quad (4)$$

式中: ϕ 为设备所在纬度, δ 为此刻太阳赤纬角, ω 为太阳时角。

直接辐射为 R_{TDNI} , 计算公式如式(5)所示。

$$R_{TGH} = R_{TDHI} + R_{TDNI} \cdot \sin(H_A) \quad (5)$$

2 系统硬件设计

如图 3 所示,该辐射监测系统硬件电路主要由电机驱动控制电路、辐射采集电路、GPS 定位电路、时钟电路、机械限位电路以及电源电路组成。

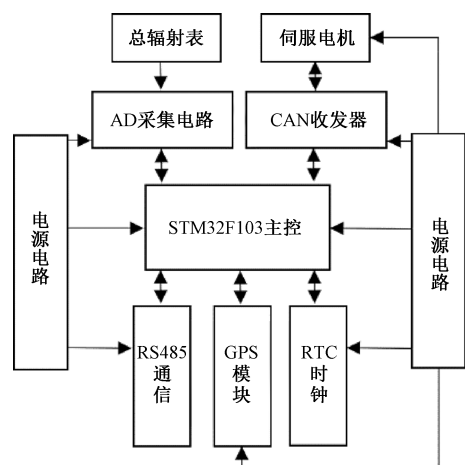


图 3 系统硬件框图

Fig. 3 System hardware block diagram

2.1 辐射传感器选型

本系统设备采用南京旗云中天科技公司的总辐射表 ZTP-11 系列作为太阳辐射传感器,其内部的热电堆阵列和硅光电二极管阵列可以独立检测太阳光强变化。作为国内首个 Class A 级别的总辐射表,精确度高,长期稳定性好,适用全天候连续观测,主要技术参数如表 1 所示,其中 ISO9060-2018 是国际化标准组织定义的总辐射表规格标准。

表 1 ZTP-11 和 ISO9060-2018 参数对比

Table 1 Comparison of ZTP-11 and ISO9060-2018 parameters

参数	ZTP-11	ISO9060-2018
测量范围	0~4 000 W/m ²	NA
等级	Class A	Class A
非线性误差	<0.2%	<0.5%
灵敏度	7~15 μV·W ⁻¹ ·m ²	NA
光谱范围	280~3 000 nm	NA
非稳定性	<0.5%/5 year	<0.8%/year

2.2 辐射采集电路设计

如图 4 所示,辐射表内部的热电堆阵列和硅光电二极管阵列输出的是双路模拟差分电压信号,采用 TI(德州仪器)的 ADS1256 模数转换芯片^[16]来进行采集。

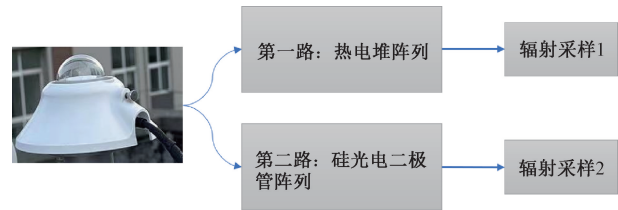


图 4 双路辐射采样

Fig. 4 Dual radiation sampling

如图 5 所示,配置两块芯片的通讯方式为硬件 SPI 口,即片选 CS、CLK、DIN 和 DOUT,通过设置输出就绪引脚

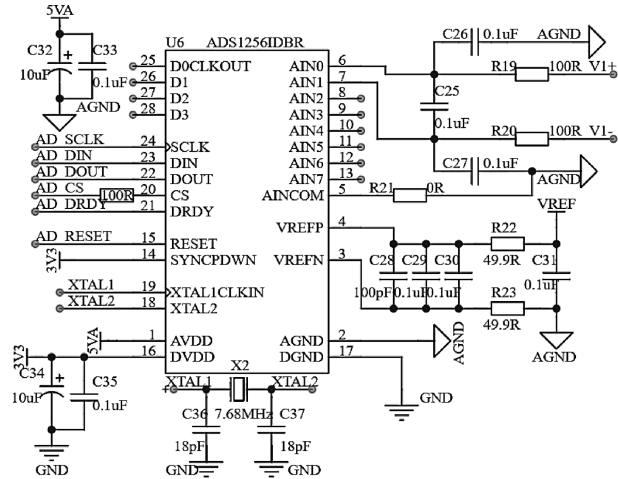


图 5 辐射采集电路

Fig. 5 Radiation acquisition circuit

(DRDY)为外部中断触发模式,可以实现两路辐射信号的同步采集。

参考电压 V_{REF} 的精准和稳定是整个测量系统的关键所在,表 2 列出了几种不同情况下模拟量输入对应的理想数字信号输出。

表 2 ADS1256 输出编码对照表

Table 2 ADS1256 output coding table

差分模拟量输入	数字信号输出
$\geq \frac{+2V_{REF}}{PGA}$	24'h7FFFFFFF
$\leq \frac{-2V_{REF}}{PGA} \left(\frac{2^{23}}{2^{23}-1} \right)$	24'h800000
0	24'h000000

需要根据实际参考电压的大小来校准 ADS1256 输出电压,校准公式如式(6)所示。

$$Vol = \frac{2V_{REF}}{PGA(2^{23}-1)} \quad (6)$$

式中: V_{REF} 为实际参考电压输入, PGA 为芯片测量增益,设为 64, Vol 是输出电压。

2.3 电机驱动控制电路

散射辐射依赖于电机带动遮光带旋转测量得到。该监测系统选择伺服电机系统^[17],采用位置编码方式,包括位置环和速度环反馈控制,根据编码器脉冲返回的位置信号和速度信号进行位置控制。由于 STM32 内部已经集成了 CAN 控制器,所以只需要在外围电路上加入 CAN 收发器电路。CAN 通信芯片采用 NXP 公司的 TJA1050,差分信号传输。

2.4 机械限位电路

光电开关^[18]的作用是为了能够让电机正确回归零位,电机轴承上装有机机械挡位,当触碰到入射光线时,电机停止并设零点,图 6 所示光电开关是 NPN 型、常开型开关,5~24 V 直流供电,平均响应频率为 3 kHz,输出开关量信号,遮光时输出 5 V 高电平,未遮光输出低电平。



图 6 NPN 型光电开关

Fig. 6 NPN type photoelectric switch

2.5 RTC 时钟和 GPS 定位电路

系统需具备计时和定位功能,才可实时计算太阳高度角。RTC 时钟电路的作用是为系统提供本地时钟,采用 NXP 公司的 PCF8563 芯片,IIC 接口与 MCU 通讯,外围电路需外接 32.768 kHz 晶振和后备电池,掉电之后其内部计

数器仍可以运行。RTC 晶振受外部温度和寄生电容的影响,需要 GPS^[19]定时授时来校准 RTC 产生的累计秒误差。

硬件实物和子模块接口如图 7 所示。

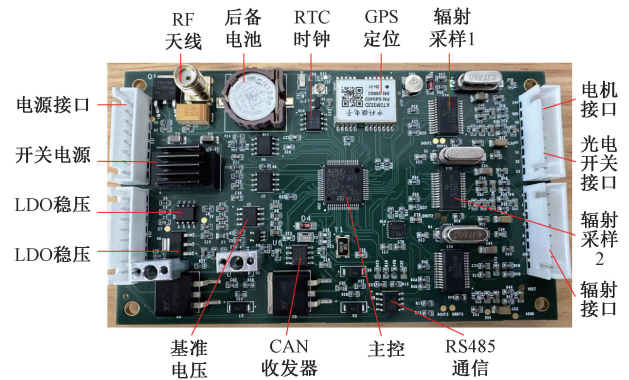


图 7 硬件实物图
Fig. 7 Hardware diagram

3 系统软件设计

由前面硬件电路可知,STM32 需使用到 UART 串口、CAN、IIC、SPI 接口与多外设进行通信。太阳辐射监测系统软件设计主要包括伺服电机驱动控制、ADS1256 辐射采集程序、太阳高度角实时计算和上位机软件设计。

3.1 伺服电机控制程序设计

该系统给定电机开始位置、结束位置和运转速度,使得电机按一定频率往复正反运动,电机从零位 1 旋转至零位 2 记为正转,从零位 2 旋转至零位 1 记为反转。电机上电后首先初始化,包括 CAN 总线配置、运行模式设置、使能电机。由于该伺服电机采用单圈绝对值编码器,掉电后零点丢失,所以在结构上配置了两个光电开关用于帮助电机寻找零点位置。伺服系统的零点非常重要,必须正确设置零点位置才能保证电机正常运转。

3.2 ADS1256 辐射采集程序设计

如图 8 所示,系统上电后,首先初始化 SPI 协议的频率、相位、极性,然后初始化 ADS1256 芯片内部配置,配置参数如表 3 所示。

表 3 ADS1256 芯片配置参数

Table 3 ADS1256 chip configuration parameters

性能参数	参数值
PGA	64
输入 Buffer	ON
采样率	1 kHz

接着拉低 RESET 引脚复位,向 MUX 寄存器写入转换的通道,接着在 SPI 总线上拉低片选,发送 SYNC 同步命令、WAKEUP 唤醒,然后发送 RDATA 命令配置为连续转换模式,在该模式下 ADS1256 会持续 AD 转换,并且将

DRDY 输出就绪引脚设置为外部中断模式。主机只需在 DRDY 拉低的时候从 SPI 总线上读取 3 个字节数据即可。测试表明,设置 DATA 采样率为 1 KSPS 的时候,DRDY 每 1 ms 拉低一次。

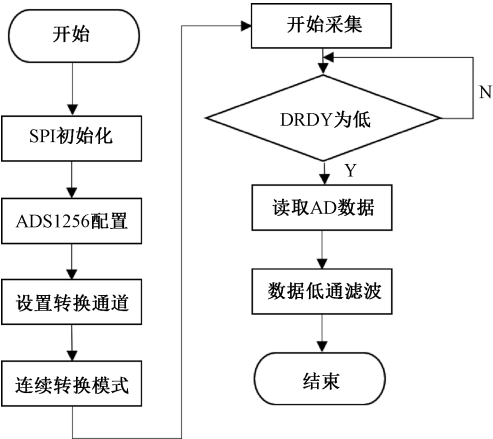


图 8 ADS1256 工作流程图
Fig. 8 ADS1256 work flow chart

主循环负责处理 Modbus 指令并执行对应的任务。在 Modbus 处理中,当有写寄存器操作时,需要更新对应参数并保存到内部 FLASH 中。主循环大致分为几个任务:辐射采样、修改波特率、修改 Modbus 从机地址、RTC 校时。当给伺服电机发送起转命令的同时,ADS1256 开始同步采样,两者在理论上可以认为是同步的。电机旋转一圈的时间是 2 s,在 AD 采样率为 1 KSPS 的情况下,可以连续采集到 2 000 个辐射值,分别取出最大值和最小值用于计算。

3.3 太阳高度角计算程序设计

由式(4)可知,太阳高度角和设备所在纬度以及当地太阳赤纬角、时角密切相关。纬度可以通过 GPS 模块直接获取,赤纬角 δ 与天数相关,计算公式如下:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(360 \cdot \frac{284 + n}{365})$$
 (7)

式中: n 表示今天是今年的第几天。

太阳时角 ω 和设备所在当地经度、时间和北京标准时间、经度相关,计算公式如下:

$$\omega = (T_T - 12 \cdot 60) \cdot 15/60$$
 (8)

$$T_T = C_T + L_C + E_Q$$
 (9)

$$L_C = 4 \cdot (L_g - 120)/60$$
 (10)

式中: T_T 表示真太阳时, C_T 为中国区域北京时间, L_C 为经度修正值, E_Q 为时差值,在中国区域,可通过查表获得。

3.4 上位机软件设计

如图 9 所示,上位机软件通过 Modbus 协议对系统采集的时间、水平总辐射、直接辐射、散射辐射、太阳高度角和经纬度进行实时上传,并且具备曲线绘制功能。

4 实验结果及数据分析

为了验证整个辐射监测系统的可行性和准确性,对结



图 9 实时数据展示

Fig. 9 Real-time data presentation

构进行了 SolidWorks 建模并提交厂方生产测试,并且用 Cadence Allegro 设计了 PCB 版图,制作并焊接了电路板。

使用上述改进测量方法的旋转遮挡式太阳辐射监测装置(图 10)、日本 EKO STR-21G-S2 双轴跟踪式太阳辐射监测设备(图 11)进行对比实验,同时同地对环境中总辐射、直接辐射、散射辐射进行对比测量。



图 10 旋转遮挡式(本系统设备)

Fig. 10 Rotating shield type(equipment of this system)



图 11 双轴跟踪式(参考测量设备)

Fig. 11 Two axis tracking type (reference measuring equipment)

太阳高度角随着系统时间实时刷新,根据太阳运动轨迹算法模型,以南京市浦口区在 2024 年 7 月 14 日的太阳运动轨迹为研究对象,表 4 列出了太阳高度角的实际测量值和理论值对比。分析表可知,6:00 前,太阳日出,此时的太阳高度角为 0°,12:00 左右,太阳高度角到达峰值,19:00

左右太阳日落,高度角为 0°,符合当地太阳运动轨迹变化,并且理论值和测量值误差小于 0.1°,满足实际测量需求。

表 4 一天中太阳高度角测量对比

Table 4 Comparison of the altitude angles during the day

时间	测量值/ (°)	理论值/ (°)	时间	测量值/ (°)	理论值/ (°)
06:00	9.096	9.090	13:00	74.697	74.700
07:00	21.269	21.264	14:00	63.526	63.530
08:00	33.781	33.785	15:00	51.084	51.081
09:00	46.448	46.448	16:00	38.413	38.416
10:00	59.030	59.025	17:00	25.822	25.840
11:00	70.913	70.914	18:00	13.503	13.516
12:00	78.979	78.985	19:00	1.653	1.648

双轴跟踪式太阳辐射监测设备的原理是依据视日运动算法来实时追踪太阳,其遮挡杆上的圆形挡片可以保证随时遮住太阳,同时位于直射表上方的四象限光电探测器可以辅助直射表精确对准太阳光线,测量精度较高。因此,以日本 EKO STR-21G-S2 双轴跟踪式太阳辐射监测设备测量结果为参考标准值,本系统设备测量结果为实际测量值,采用最小二乘法进行线性拟合,通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,以均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)作为误差分析指标。

设有 n 组数据,表示为 $(x_i, y_i)(i = 1, 2, \dots, n)$, 对应的拟合曲线为 $\hat{y} = a + bx$, 将 x_i 代入拟合曲线得到 $\hat{y}_i = a + bx_i$, 残差 $\Delta_i = y_i - \hat{y}_i$, 预测值和观测值的偏差平方和公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (11)$$

最小二乘法就是要 Q 值最小,通过对 Q 分别求 a 和 b 的偏导,得到 Q 关于 a 和 b 的方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)] = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)] x_i = 0 \quad (13)$$

解上述方程组,求得:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (15)$$

均方根误差(RMSE)是均方误差的算数平方根, RMSE 的值越低,表示预测模型的准确性越高,公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (16)$$

决定系数(R^2)是一种用于评估回归模型拟合优度的

统计量。当 R^2 越接近1,拟合效果越好,公式如下:

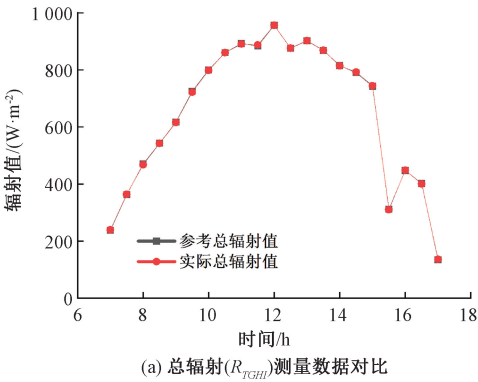
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

(17)

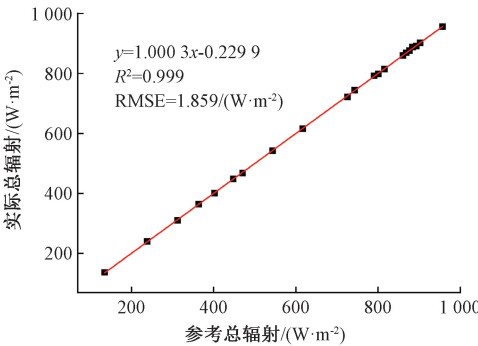
式中: n 为样本数量, x_i 为参考值, \bar{x} 为参考平均值, \hat{y}_i 为预测值, y_i 为实际值, \bar{y}_i 为平均值。

测试时间选择7:00~17:00,设置系统采样频率为5 s一次,平均每半小时输出一次数据。

当电机复位至零位时,即辐射传感器完全暴露在太阳光下,ADS1256采样芯片会分别采集热电堆阵列和硅光电二极管阵列此刻的瞬时光强大小,记此刻的辐射值为太阳总辐射。图12所示为参考设备和本系统设备所测得的总辐射数据对比图。



(a) Comparison of total radiation measurements



(b) Error analysis of total radiation

图12 太阳总辐射(R_{TGH})测量结果对比
Fig. 12 Comparison of measurements of total solar radiation

图12(a)中实际总辐射数据是热电堆秒级响应的结果,其响应稳定、动态误差小,适合秒级的静态光强变化。图中太阳辐射值在个别点出现比较大的波动原因是太阳被云彩遮挡,被云遮住后辐射传感器所检测到的太阳光强明显下降,导致感应电压减小,总辐射随之下降。

通过分析图12(b)可知,该系统设备太阳总辐射测量结果相对于参考设备测量结果,均方根误差(RMSE)为1.859 W/m²,相关系数 $R^2=0.999$,具有良好的线性相关性。国际ISO9060定义太阳总辐射的测量误差<2%,证

明该系统设备在总辐射观测上符合高精度测量需求。

由式(3)可知,散射辐射和 V_{Smin} 有关,系统在采样完瞬时总辐射后,会给电机发送起转命令,设置位置模式下转动速度和角度分别为2.6 rad/s和5.2 rad,电机带动遮光带旋转后,ADS1256开始同步采集两路辐射信号动态变化过程,二者交替采集,采样间隔为1 ms,连续采集2 s。单次测量下感应电压对比如图13所示。由图13可以看出,在遮光带遮住辐射表的瞬间,热电堆阵列和硅光电二极管阵列对光强的响应有很大的差异。热电堆由于变化缓慢的原因,所检测到的感应电压衰减较慢,衰减深度较小。相反,硅光电二极管所检测到的感应电压衰减非常迅速,在采样点数为1156附近,取得最小感应电压值 V_{Smin} ,并且衰减深度达到了4.5 mV左右。

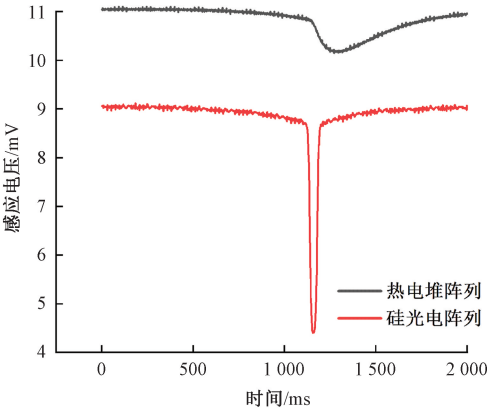


图13 单次测量下感应电压对比
Fig. 13 Comparison of induced voltage in a single measurement

记热电堆响应的感应电压值最大为 V_{Tmax} ,最小为 V_{Tmin} ,硅光电二极管响应的感应电压值最大为 V_{Smax} ,最小为 V_{Smin} ,多次重复上述实验,如表5所示。

表5 多次测量下感应电压对比				
Table 5 Multiple induced voltage comparisons mV				
次数	V_{Tmax}	V_{Tmin}	V_{Smax}	V_{Smin}
1	9.444	8.649	7.666	4.616
2	7.505	6.949	6.181	4.437
3	6.332	5.888	5.262	4.175
4	5.032	4.682	4.254	3.704

因此,本文利用硅光电二极管阵列毫秒级响应的优势去寻找感应电压的最低点,但是由于其自身存在余弦效应、易受温度影响以及非均匀光谱响应性的缺点,需要使用热电堆阵列来校准硅光电二极管阵列并实时更新校准系数 C_{SN} ,公式如下:

$$C_{SN} = \frac{V_S}{R_{TGH}} = \frac{V_S \cdot C_T}{V_T}$$

(18)

硅光电二极管人为校准的过程具有复杂性和多变性,而热电堆的校准过程相对简单,只需要用参考辐射值除以

对应时刻的感应电压值即可。表 6 给出了在不同的天气条件下以及不同时间段硅光电二极管和热电堆灵敏度系数变化差异。

表 6 不同天气条件下灵敏度系数对比
Table 6 Comparison of sensitivity coefficients under different weather conditions ($V \cdot W^{-1} \cdot m^2$)

天气	时间	C_S	C_T	C_{SN}
阴天	09:00	11.205	12.380	11.205
	10:00	11.186	12.371	11.186
	10:30	11.185	12.318	11.185
	11:00	11.178	12.326	11.178
	13:00	11.234	12.417	11.234
	14:00	11.235	12.307	11.235
	09:00	11.362	12.378	11.362
晴天	10:00	10.405	12.345	10.405
	10:30	10.267	12.358	10.267
	11:00	10.291	12.362	10.291
	13:00	11.317	12.343	11.317
	14:00	11.458	12.383	11.458

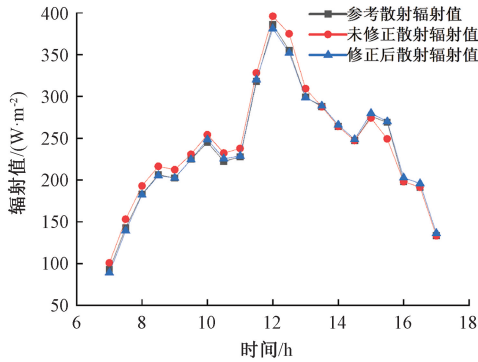
由表 6 可知,热电堆灵敏度系数 C_T 波动范围小,在阴天、晴天均表现稳定,可以视作一个固定常数。然而,硅光电二极管灵敏度系数 C_S 在阴天和晴天的不同时间下变化差异较大。在晴天的情况下,由于早晚温差大并且在 10:00~11:00 区间内温度上升明显,导致硅光电二极管光电转换效率下降,进而导致 C_S 明显降低,而当温度逐渐趋于饱和后,硅光电二极管又会逐渐恢复转换效率,从而 C_S 也会回归正常。在阴天情况下,早晚温差动态范围小,硅光电二极管相对于温度变化不敏感,因此 C_S 大约在 ± 0.1 之内波动变化。针对 C_S 可变、无法作为固定常数的情况下, C_{SN} 能够较好的还原出 C_S 的变化,所以散射辐射的计算公式又可以表示为:

$$R_{TDHI} = \frac{V_{Smin}}{C_{SN}} = \frac{V_T \cdot V_{Smin}}{C_T \cdot V_S} \tag{19}$$

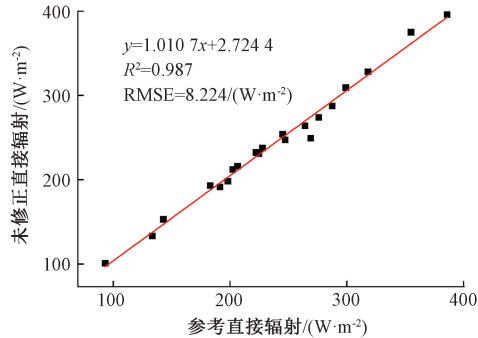
因此,根据上式对散射辐射进行了对比测量,结果对比如图 14 所示。且由式(18)可知, C_{SN} 和第一次静态测量的过程相关,而式(19)中 V_{Smin} 和第二次动态检测过程相关,两次校验之间,环境因素变化引起的误差可以极大的降低。

图 14(a)中未修正过的散射辐射数据(红色曲线)是单一硅光电二极管阵列毫秒级响应的结果,响应误差较大,蓝色曲线是加入热电堆进行动态校准后响应的测量结果。可以看出,使用双路探测器明显可以缩小系统误差和环境误差,有效的弥补了二者在各自性能上的缺点。

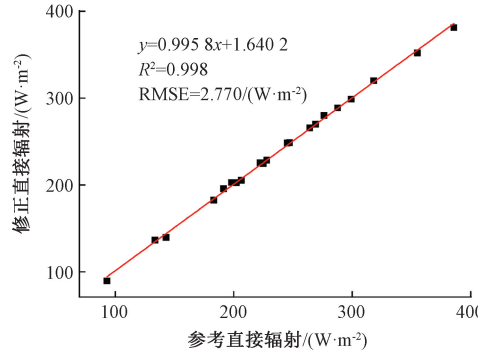
对比图 14(b)、(c)可知,经校准后测量的散射辐射相比传统使用单一硅光电二极管测量的散射辐射,决定系数(R^2)提升了大约 0.011,整体数据更加收敛,均方根误差



(a) 散射辐射(R_{TDHI})测量数据对比
(a) Comparison of scattered radiation measurements



(b) 未修正散射辐射(R_{TDHI})测量误差分析
(b) Error analysis of uncorrected scattered radiation



(c) 修正后散射辐射(R_{TDHI})测量误差分析
(c) Error analysis of corrected scattered radiation

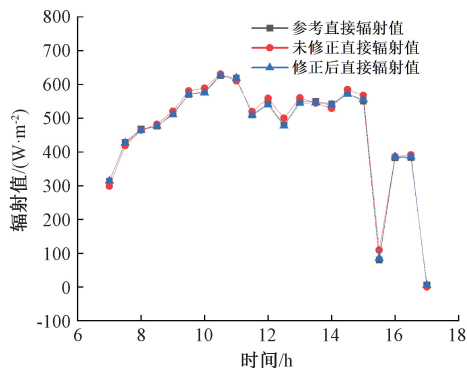
图 14 太阳散射辐射(R_{TDHI})测量结果对比

Fig. 14 Comparison of measurements of scattered solar radiation

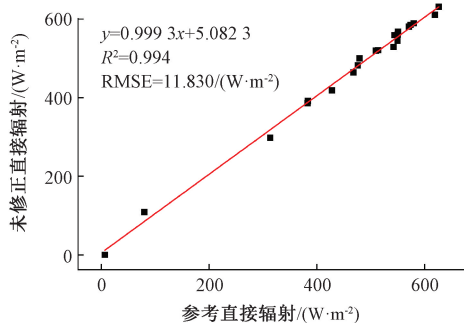
(RMSE)整体下降了 $5.454 W/m^2$,辐射误差更小。国际 ISO9060 定义散射辐射的测量误差 $<2\%$,证明本系统设备在散射辐射观测上符合高精度测量需求。

图 15(a)所示为直接辐射数据是通过总辐射和散射辐射间接计算得出来的结果,计算公式如式(5)所示,因此散射辐射的精确度直接关系到直接辐射的精确度。在多云变化的天气,由于云层的遮挡,辐射值会急剧下降,导致图中出现很多下降的尖峰,属于正常现象。

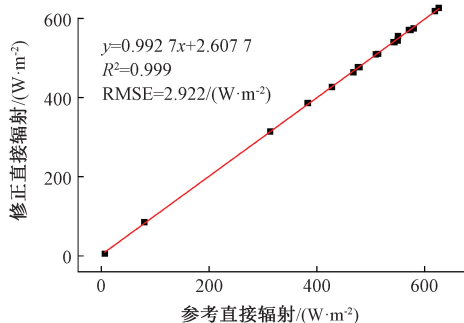
对比图 15(b)、(c)可知,散射辐射经过校准后计算出来的直接辐射,相比未校准,决定系数(R^2)提升了大约



(a) 直接辐射(R_{TDNI})测量数据对比
(a) Comparison of direct radiation measurements



(b) 未修正直接辐射(R_{TDNI})测量误差分析
(b) Error analysis of uncorrected direct radiation



(c) 修正后直接辐射(R_{TDNI})测量误差分析
(c) Error analysis of corrected direct radiation

图15 太阳直接辐射(R_{TDNI})测量结果对比

Fig. 15 Comparison of measurements of direct solar radiation

0.005, 整体数据更加收敛, 均方根误差(RMSE)整体下降了 8.908 W/m^2 , 国际 ISO9060 定义 Class A 级直接辐射表的测量误差 $< 2\%$, 证明本系统设备在直接辐射观测上符合高精度测量需求。

5 结 论

本文设计的旋转遮挡式太阳辐射监测装置采用一体化设计, 实现了太阳总辐射、直接辐射和散射辐射的高精度监测。本文提出的热电堆阵列和硅光电二极管阵列交替采集的方法, 可以对硅光电二极管阵列进行实时校准, 极大降低了环境因素变化引起的误差, 从而提高了硅光电二极管阵列的检测精度。相较于传统检测方案, 该检测系统不仅兼

具热电堆和硅光电二极管型太阳辐射传感器的优势, 而且具备低成本、高精度、长期稳定和毫秒级快速时间响应的优点, 对太阳能资源评估、光伏电站功率预报具有重要的意义。

参考文献

- [1] 王东风, 刘婧, 黄宇, 等. 结合太阳辐射量计算与 CNN-LSTM 组合的光伏功率预测方法研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2):443-450.
WANG D F, LIU J, HUANG Y, et al. Research on photovoltaic power prediction method combining solar radiation calculation and CNN-LSTM [J]. Solar Energy, 2024, 45(2):443-450.
- [2] 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 station based on solar radiation [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20):28-31.
- [3] 姚玉璧, 郑绍忠, 杨扬, 等. 中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10):524-535.
YAO Y B, ZHENG SH ZH, YANG Y, et al. Research progress and prospect of solar energy resource evaluation and utilization efficiency in China [J]. Solar Energy, 2022, 43(10):524-535.
- [4] 王陆地. 自动太阳直接辐射测量仪的设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
WANG L D. Design of automatic solar direct radiation measuring instrument [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023.
- [5] BLUM N B, WILBERT S, NOURI B, et al. Measurement of diffuse and plane of array irradiance by a combination of apyranometer and anall-sky imager[J]. Solar Energy, 2022, 232:232-247.
- [6] 武学占, 雷程, 梁庭, 等. 圆形热电堆红外探测器的结构优化与仿真分析[J]. 电子测量技术, 2021, 44(13):17-22.
WU X ZH, LEI CH, LIANG T, et al. Structure optimization and simulation analysis of circular thermopile infrared detector [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(13):17-22.
- [7] 吕文华, 边泽强, 曾涛. 光电型总辐射表校准方法研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(5):1-5.
LYU W H, BIAN Z Q, ZENG T. Research on calibration method of photoelectric total radiometer[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(5):1-5.

- [8] 梁少林, 王咏梅, 石恩涛, 等. SOLYS Gear Drive 太阳跟踪器的控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(1):82-83,87.
LIANG SH L, WANG Y M, SHI EN T, et al. Design of control system of SOLYS Gear Drive solar tracker [J]. Computer Measurement and Control, 2017, 25(1):82-83,87.
- [9] NOLLAS F M, SALAZAR G A, GUEYMARD C A. Quality control procedure for 1-minute pyranometric measurements of global and shadowband-based diffuse solar irradiance[J]. Renewable Energy, 2023, 202:40-55.
- [10] JESSEN W, WILBERT S, NOURI B, et al. Calibration methods for rotating shadowband irradiometers and optimizing the calibration duration[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9:1601-1612.
- [11] BADOSA J, WOOD J, BLANC P, et al. Solar irradiances measured using SPN1 radiometers: Uncertainties and clues for development [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7:4267-4283.
- [12] FORSTINGER A, WILBERT S, DRIESSE A, et al. Physically based correction of systematic errors of rotating shadowband irradiometers [J]. Energy Meteorology, 2020, 29:19-39.
- [13] GEUDER N, AFFOLTER R, GOEBEL O, et al. Validation of direct beam irradiance measurements from rotating shadowband pyranometers in a region with different atmospheric conditions[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2016, 138(5):051007.
- [14] MARTINS G L, MANTELLI S L, RUTHER R. Evaluating the performance of radiometers for solar overirradiance events[J]. Solar Energy, 2022, 231:47-56.
- [15] 胡寅, 梅月兰. 嵌入式太阳跟踪定位控制系统设计与研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(18):37-41.
HU Y, MEI Y L. Design and research of embedded solar tracking and positioning control system [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(18):37-41.
- [16] 陈培南. 高精度的低频 Sigma-Delta AD 转换器研究[D]. 厦门:厦门大学, 2022.
CHEN P N. Research on high precision low frequency Sigma-Delta AD converter [D]. Xiamen: Xiamen University, 2022.
- [17] 张华西, 严飞, 刘卿卿, 等. 基于 FPGA 的多通道伺服电机控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(12):171-177.
ZHANG H X, YAN F, LIU Q Q, et al. Design of multi-channel servo motor control system based on FPGA [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(12):171-177.
- [18] 林邦舜. 基于光电开关的产线物位监控电路设计[J]. 光源与照明, 2023(8):183-185.
LIN B SH. Design of production line level monitoring circuit based on photoelectric switch[J]. Source and Illumination, 2023(8):183-185.
- [19] 张锦荣, 王康谊, 张云逸, 等. 基于北斗/GPS 的水中应急定位系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(6):87-93.
ZHANG J R, WANG K Y, ZHANG Y Y, et al. Design of underwater emergency positioning system based on Beidou/GPS [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(6):87-93.

作者简介

徐志安, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式系统设计与传感器信号处理。

E-mail: 2658070572@qq.com

李鹏(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为嵌入式系统设计、信道仿真、信号处理。

E-mail: peng.li@nuist.edu.cn

冯姣, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线通信、信道仿真。

E-mail: jiao.feng@nuist.edu.cn