

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2517804

基于光散射的光伏组件积灰检测系统设计^{*}

董嘉浩^{1,2} 乔杰^{1,2} 张锐³ 王永² 冯姣^{1,2}(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 210000;
3.阳光智维科技股份有限公司 合肥 210046)

摘要:针对现有光学积灰检测方案易受外界环境因素的干扰,检测精度不高的问题,提出了一种新型光伏组件积灰污染比检测方法及检测系统,该系统在检测算法中采集温湿度数据,降低了环境温湿度对检测结果的影响;优化光路结构,同时收集入射光强度数据对光敏元件接收的光强信号进行补偿并设计同步检波电路进行解调,剔除背景光干扰,提高了检测精度;设计新型校准方法,降低校准难度和成本并进一步提高精度。测试实验结果表明:该系统精度高,抗干扰性强,在户外高温条件下的最大偏差为1.67%,相较于传统设备精度提高了0.55%,同时提高了低温高湿环境下的稳定性约2.9%并可以进行长期监测,满足光伏电站运维需求。

关键词:嵌入式ARM;同步检波;积灰污染检测

中图分类号:TN98 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:510.1050

Development of a photovoltaic module dust detection system based on light scattering

Dong Jiahao^{1,2} Qiao Jie^{1,2} Zhang Rui³ Wang Yong² Feng Jiao^{1,2}(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;2. Nanjing Qiyun Zhongtian Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
3. Sungrow Smart Maintenance Technology Co., Ltd., Hefei 210046, China)

Abstract: To address the limitations of existing optical dust detection methods, which are susceptible to environmental factors and lack precision, a novel method and system for detecting dust accumulation on photovoltaic modules has been developed. This system integrates temperature and humidity data into its detection algorithm to mitigate environmental influences on measurement accuracy. The optical path structure is optimized, and incident light intensity data are collected to compensate for variations in the light signals received by photosensitive elements. A synchronous demodulation circuit is designed to eliminate background light interference, thereby enhancing detection accuracy. Furthermore, a new calibration method reduces both calibration complexity and cost while further improving precision. Test results demonstrate that this system achieves high accuracy and robust anti-interference performance, with a maximum deviation of 1.67% under outdoor high-temperature conditions, outperforming traditional equipment by 0.55%. Additionally, the stability in low-temperature and high-humidity environments has been enhanced by approximately 2.9%, enabling long-term monitoring capabilities, meeting the operational requirements of photovoltaic power stations.

Keywords: embedded ARM; lock-in amplification; dust pollution detection

0 引言

根据相关研究,光伏组件积灰(或污染)极易造成电力损失,随着光伏产业新增装机容量逐年上升,预计到2027年全球装机容量将超过3太瓦^[1]。Ilse等人估计目前全球

能源产量的4%~7%是由于光伏组件积灰损失的,从2018年的总损失至少为30~50亿欧元^[2],到2021年预计高达70亿欧元^[3],这个数据仍在逐年增长。

如何实现对光伏电站积灰污染的检测,利用检测数据估算积灰电力损失、优化电站清洁策略、降低运维成本来提

收稿日期:2025-01-03

*基金项目:国家重点研发计划(2022YFB2902100)、江苏省重点研发计划(BE2023088)、江苏省双创团队项目((2023)200008)资助

升效益^[4], 目前国内外对于积灰污染比探测的方法主要有以下几种: 1) 理论公式模型预测^[5], 该方法可以在干燥条件下对积灰情况进行预测, 且可以结合环境与光伏组件相关参数提高预测准确性。2) 污染站检测^[6], 该方法通过设置参考光伏电站, 来精准检测积灰程度, 但其存在维护成本高且难以在偏远地区实施的情况^[7]。3) 根据光伏组件的 $I-V$ 曲线反应运行状态的检测方法, 该方法为目前的主流检测方法, 可以检测光伏组件的积灰程度^[8]。4) 图像积灰检测^[9], 该方法通过图像识别, 并以深度学习为数据分析和检测方法对组件表面的积灰状态进行评估, 具有非常广阔的研究前景。5) 光学积灰检测^[10], 该方法通过对积累在光伏组件表面的灰尘的光学特性来计算积灰污染比, 具有性价比高、维护简单等特点, 有广泛的应用前景。

但如今在对该方法的实际应用中, 光学积灰检测方案需要考虑严酷多变的大气环境, 并具有良好的精度和稳定性。例如, 光学积灰检测所采用的光敏元件和光源^[11]等核心部件光电特性容易受到温度与湿度等外界环境因素的影响, 同时, 外界环境杂散光也会影响最终的积灰检测效果。

为了改善这一状况, 本文重点设计了一种基于光散射原理的光伏组件积灰检测系统, 该系统在设计检测方法时加入了对环境温湿度的采集来对检测结果进行补偿, 降低环境温湿度对检测结果的干扰, 稳定性较传统设备提升 2.9%。同时通过优化光路结构并设计同步检波等电路, 提高检测精度, 精度较传统设备提升了 0.55%。同时, 该系统集成了一种高度集成, 且方便使用的新型校准方法, 进一步提升精度并降低了校准难度和成本。

1 总体方案设计

1.1 检测方法设计

当光伏组件表面发生积灰时, 光伏组件表面的灰尘颗粒会对入射的阳光发生吸收、反射和散射作用, 导致透过光伏玻璃抵达太阳能电池片的光照减少, 最终使得光伏组件整体的输出功率降低。这些积灰对光照的散射强度遵循米散射原理^[12], 如图 1 所示。

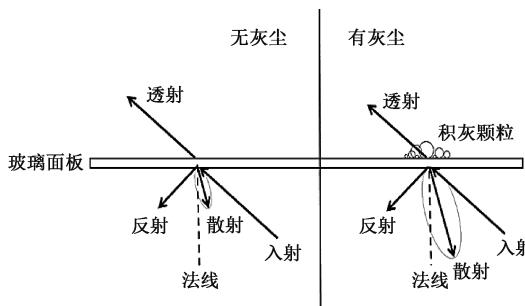


图 1 积灰检测基本原理

Fig. 1 Basic principle of dust accumulation detection

基于这一点, 本文提出了一种新型光伏组件积灰检测方法: 首先, 通过发射人造可控光源至光伏组件的玻璃面

板, 通过光敏元件接收光波经过玻璃面板作用后的光强信号并通过解调剔除背景光干扰, 形成可用的光信号, 此外通过温湿度传感器检测采集腔体内的温湿度并通过温湿度数据对光敏元件接收的光强信号进行补偿。具体步骤如下:

- 1) 采集腔体内的温湿度数据 RH ;
- 2) 将 RH 与湿度阈值 RH_0 进行对比;
- 3) 当 $RH < RH_0$ 时, 光敏元件接收的光信号数据有效, 当 $RH > RH_0$ 时, 数据无效。

以上所述光敏元件包括入射光光敏元件和散射光光敏元件, 分别用于检测入射光强度和散射光强度, 并通过式(1)计算所述积灰污染比 SR 。

$$SR = A_0 \times \frac{Rd}{R_i} + A_1 \times \frac{Rb}{R_i} + A_2 \times T + A_3 \quad (1)$$

其中, Rd 表散射光强度; Rb 表示背景光强度; R_i 表示入射光强度; T 表示传感器温度; A_0, A_1, A_2, A_3 为常数。

1.2 校准方法设计

为保证积灰检测系统的精度, 减少外界环境温度对检测结果的影响。本文设计了一种新型校准方法, 与传统的仅搭设参考光伏电站进行设备校准的方法^[13]不同, 本文在校准过程中额外采集外界环境温度数据, 来计算校准参数, 以此进行数据补偿, 并且通过检测系统自带的光伏电池片测量的真实积灰污染比(SR_{RC})与积灰检测系统得到的光学积灰污染比数据(SR_0)通过式(2)运算得到校准系数 k , 并写入设备完成积灰检测系统的校准。使校准方法在保持原有提高测量精度的功能基础上大大降低了实施成本, 校准过程也变得方便快捷, 无需再搭设参考光伏电站。

$$k = SR_{RC}/SR_0 \quad (2)$$

其中, k 表示积灰污染比校准系数。真实积灰污染比数据 SR_{RC} 在校准时采用短路电流法来测量得到, 具体计算公式为式(3)。

式(4)为计算有效辐射(effective irradiance, EI) EI_1 , 式(5)为计算积灰光伏电池片在无灰尘遮蔽情况下的理论短路电流 I_{SC2_1} 。

$$SR_{RC} = I_{SC2}/I_{SC1} \quad (3)$$

$$EI_1 = EI_0 \frac{I_{SC1}(1 - \alpha(T_1 - T_0))}{I_{SC1_0}} \quad (4)$$

$$I_{SC2_1} = I_{SC2_0}(1 + \alpha \times (T_2 - T_0)) \times (EI/EI_0) \quad (5)$$

其中, EI 表示实况条件下有效辐射强度; EI_0 表示标准条件下辐射强度, 为常数 $1\ 000\ W/m^2$; α 表示光伏电池片温度系数, 为出厂常数; T_0 表示标准条件下温度, 为常数; T_1 表示洁净光伏电池片实况温度; T_2 表示积灰光伏电池片实况温度; I_{SC1_0} 表示洁净光伏电池片在标准条件下的短路电流, 为出厂常数; I_{SC1} 表示洁净光伏电池片短路电流; I_{SC2} 表示积灰光伏电池片实况短路电流; I_{SC2_1} 表示积灰光伏电池片在无灰尘遮蔽情况下的理论短路电流; I_{SC2_0} 表示积灰光伏电池片在标准条件下的短路电流, 为出厂

常数。

2 硬件系统设计

2.1 结构设计

积灰检测系统(如图 2 和 3 所示)主要由:采样室、光伏电池片单元、背板温度传感器等构成的,玻璃面板 1008 区域为系统的采集区域,下面放置了检测系统的采样室,用于采集该区域的数据。

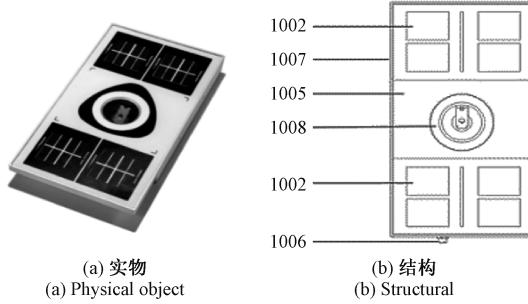


图 2 积灰检测系统实物及结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the physical object and structure of the dust detection system

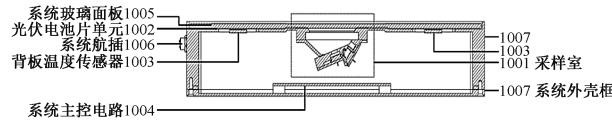


图 3 积灰检测系统结构剖面图

Fig. 3 Sectional view of the dust detection system structure

图 4 为积灰检测系统的采样室的具体结构图。如图所示,采集室的第一连接架 16 和第二连接架 17 均为倾斜设置,且其相连处形成 V 字型结构,第一连接架 16 底部固定有光发射和反馈电路板 6 和光接收电路板 11,上部设有接收光孔 12 和散射光光敏元件 13,接收光孔 12 位于发射光孔 7 左侧,散射光光敏元件 13 放置在人造光源 8 的散射路径上,用于接收光源的散射光。

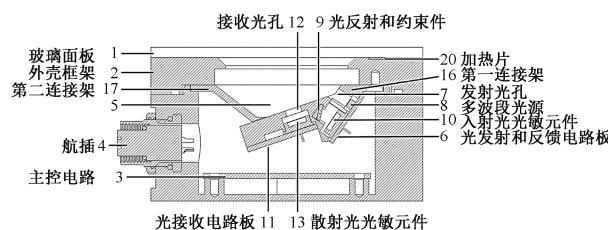


图 4 积灰检测系统采样室结构剖面图

Fig. 4 Sectional view of the sampling room structure of the dust detection system

其中人造光源 8,通过预留光孔 7 照射到系统玻璃面板 1 上,形成在玻璃面板 1 外侧的透射光和在玻璃面板 1 内侧的反射光和散射光。

传统的散射光测量光路结构往往只测量散射光光强,

这也忽视外界杂散光会与散射光混合,为了降低外界环境杂散光对检测结果的影响,本文优化了光路结构,在入射光的入射路径上安装光反射和约束件 9,所述光反射和约束件用于调节人造光源 8 入射到入射光光敏元件 10 上的光强,同时测量入射光强度,从而与散射光的进行比较来对检测数据补偿。

2.2 电路设计

硬件电路如图 5 所示,主要包括主控单元、光源调制电路、信号调理电路、RS485 通信电路、供电电路以及其他外置功能模块电路。

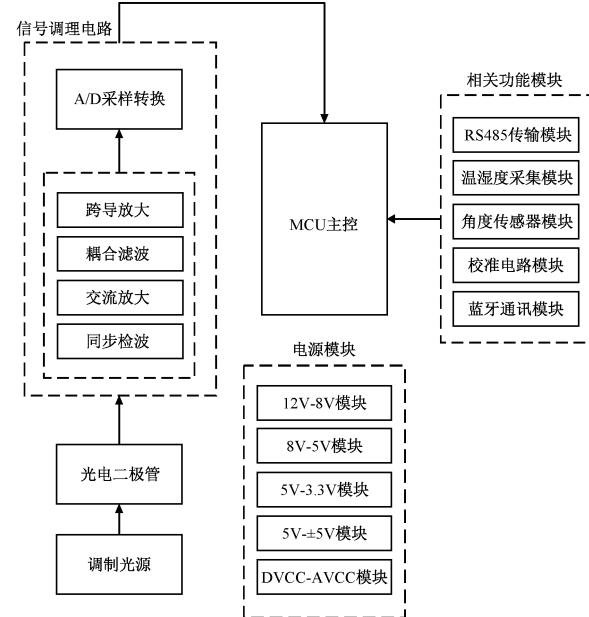


图 5 硬件电路总体框架

Fig. 5 Overall framework of hardware circuit

由于光伏面板积灰引起的光强变化极其微弱,且光电二极管采集的光信号为经光伏玻璃漫反射后的散射光,散射光强变化引起的电流变化较小^[14]。除此以外,积灰检测系统工作场景中背景光光功率强,光伏面板的积灰引起的光强变化极易淹没在外部的强背景光内,因此对淹没在强噪声背景中漫反射光的微弱信号检测是必不可少的^[15]。

本文设计了基于电子开关式的同步检波电路来实现了锁相放大^[16],以光源调制电路产生特定频率的调制光信号,设计信号采集电路用以实现微弱电压信号的放大与滤波,最大限度的减少杂波的影响,从载波信号中解调出需要的电压信号。此外,为了提高精度并降低外界因素干扰,还设计了采集温度湿度,以及参考电池片校准电路,为积灰比的测量数据补偿与校准提供参数。

以下为光伏组件积灰检测系统的部分电路原理图。首先是图 6 光源调制电路,通过单刀双掷开关 ADG633 调制一个可控的 LED 光源,该 LED 时钟信号为 5 kHz 的方波,再通过 AD8618 运算放大器形成简单的电流源,以恒定电流驱动该光源,使其照射在待测光伏面板上,使检测窗口区

域的污垢积累变化转换为光信号的变化。

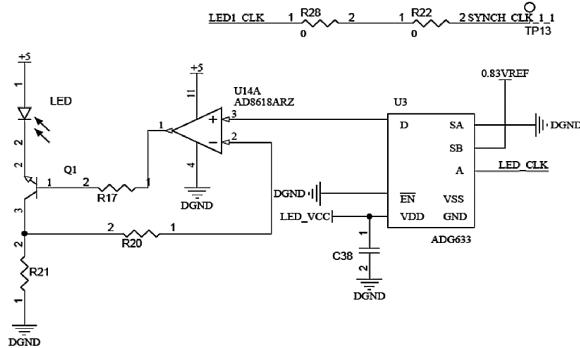


图 6 光源调制电路

Fig. 6 Light source modulation circuit

由于积灰污染变化引起的光强变化较小,电流变化为 mA 级别,因此本文基于 AD8615 运算放大器,设计了图 7 跨导放大电路,将输入光电流转换为电压并放大输出。其中 R_3 为反馈电阻, C_2 为反馈电容,用于补偿总输入电容,以及反馈电阻 R_3 产生的极点。

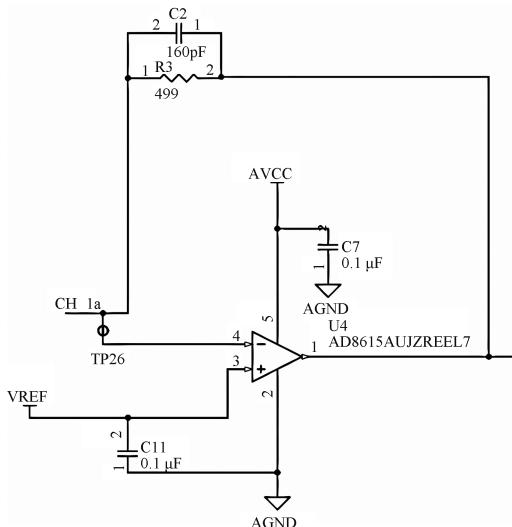


图 7 跨导放大电路

Fig. 7 Transconductance amplifier circuit

在经过跨导放大电路后,电路的低频噪声也一并被放大,因此设计了图 8 植合滤波电路对信号进行滤波,植合滤波电路的前端为二阶 RC 高通滤波器,用以衰减外界低频光信号的干扰,经由放大器后,将输出电压偏置至基准电压 2.5 V。

接着是图 9 交流放大电路,将植合滤波后的交流电压进一步放大,其中 R_{72} , R_{78} 对参考电平(VREF)进行分压,控制放大后的直流电压仍为 2.5 V,调整 R_{68} , R_{69} 阻值可控制放大器的放大倍数,放大倍数为 $1 + R_{69}/R_{68}$ 。

图 10 为同步检波电路,采用 AD8271 差动放大器和 ADG733 三通道单刀双掷开关组成。当 SYNCH_CLK_1=1(LED 时钟同频信号)置 1 时, $V_o = V_1$; 当 SYNCH_CLK_1=0 时, $V_o = V_2$ 。

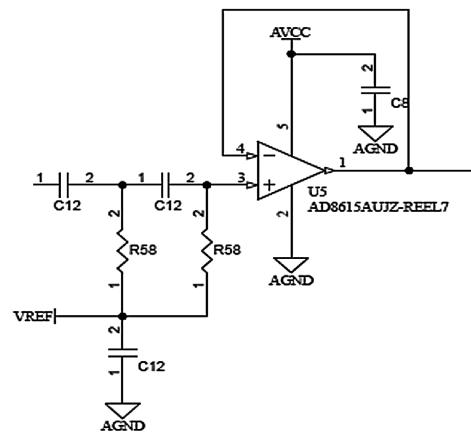


图 8 植合滤波电路

Fig. 8 Coupled filtering circuit

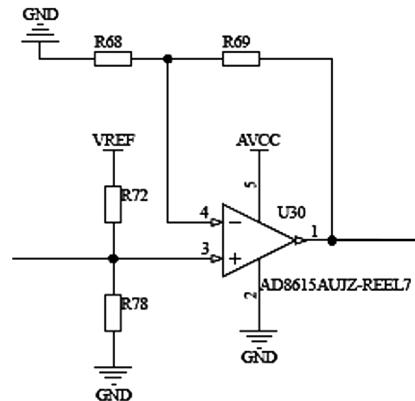


图 9 交流放大电路

Fig. 9 AC amplifier circuit

当 $V_o = 2VREF - V_1$ 时,该电路过滤频率不与 LED 时钟同步的信号,以及奇次谐波信号(LED 时钟信号为方波),来实现同步检波。

图 11 校准电路基于 24 位高精度 A/D 转换芯片 ADS1256,对 4 块以差分信号方式输入的光伏电池板的短路电流信号进行采样,并通过 SPI 协议传输至 MCU,再经过滑动均值滤波算法处理后用于对系统进行校准。

图 12 温湿度采集电路通过 SHT40 芯片对外界环境温度与湿度数据进行采集,并通过 IIC 协议传输至 MCU,经过计算后用于后续对检测结果与系统校准进行数据补偿。

3 软件设计

积灰检测系统下位机程序主要包括 4 个模块:主程序、定时器模块、串口中断处理模块和任务处理模块。主程序是整个程序的核心,负责调用具体功能函数;串口中断处理程序则实时响应询问指令并根据其请求类型确定串口下一步的数据返回类型;任务处理程序是由多个具体的功能函数组成,这些功能函数主要根据请求数据帧的种类进行划

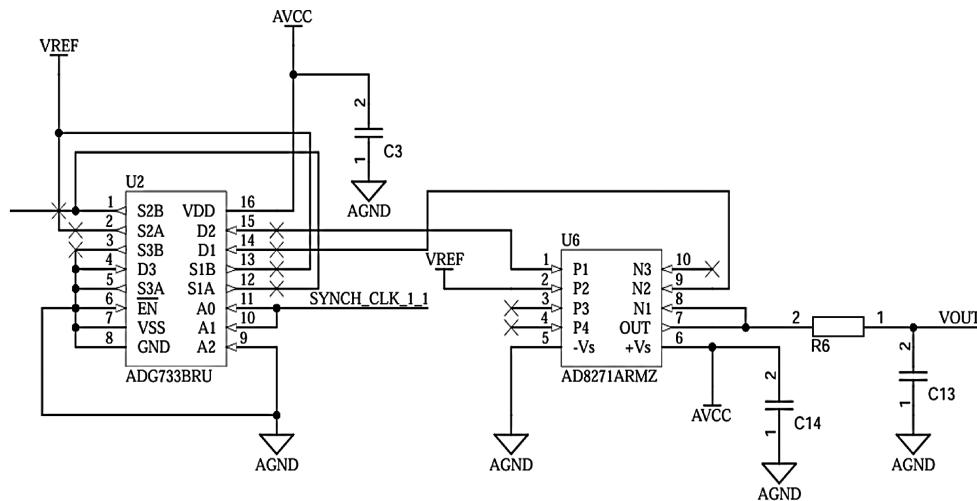


图 10 同步检波电路

Fig. 10 Synchronous detection circuit

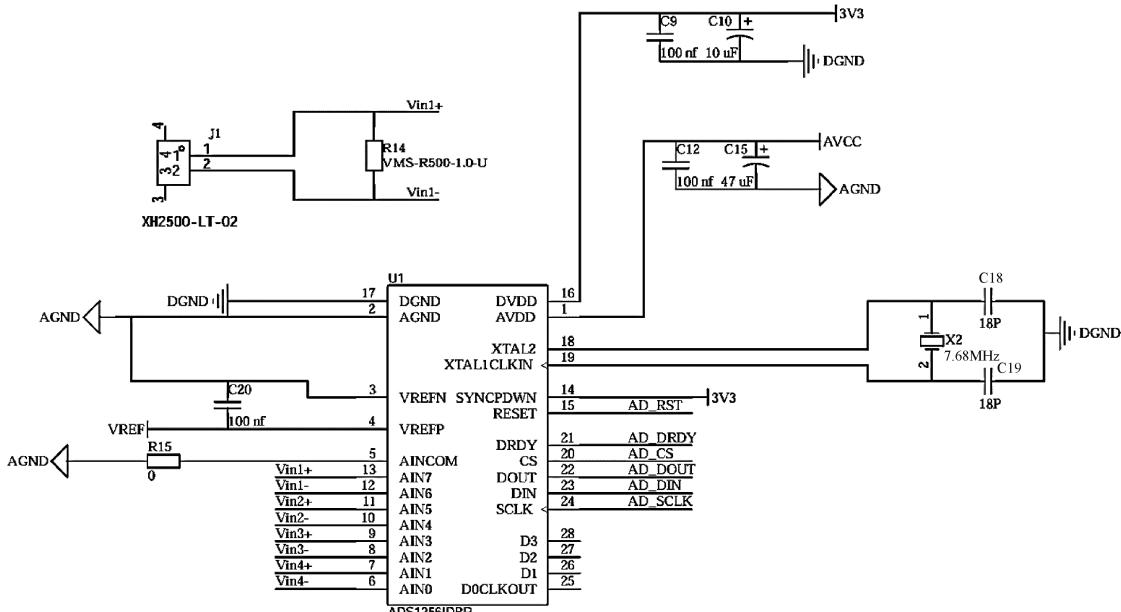


图 11 校准电路

Fig. 11 Calibration circuit

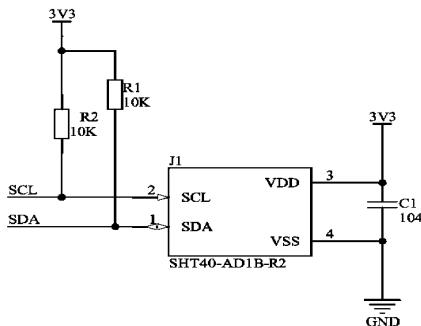


图 12 温湿度采集电路

Fig. 12 Temperature and humidity acquisition circuit

分，用于驱动各个传感器或是处理数据等；定时器模块则负责整个程序的时序处理，协调各个模块工作的先后顺序。

系统软件总体流程如图 13 所示。

4 实验设计

4.1 校准测试

1) 试验方案

为了检验校准方法的科学性与精准性，对此进行模拟户外灰尘自然沉降的扬尘试验。

试验选用主要成分为 SiO_2 的灰尘颗粒进行模拟积灰，

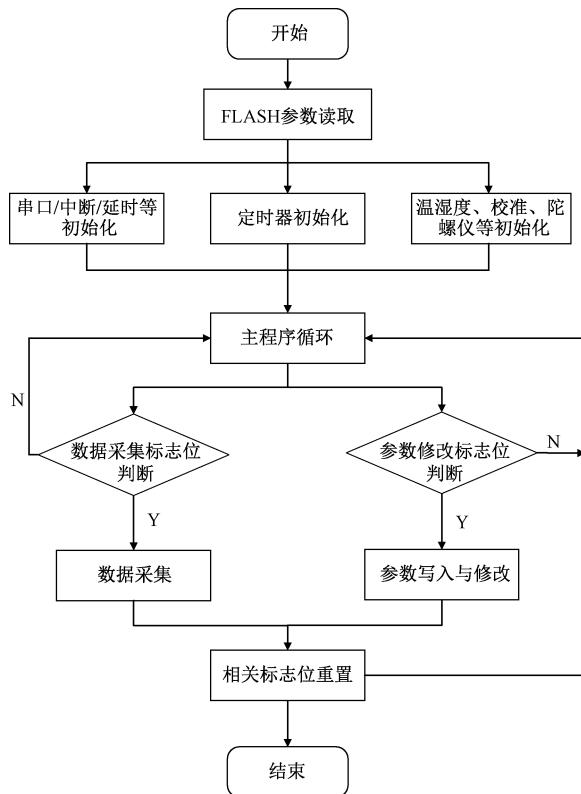


图 13 系统软件总体流程

Fig. 13 Overall flowchart of system software

利用喷壶将粉尘均匀的覆盖在积灰监测系统面板上。如图 14 所示,将积灰监测系统放置在高 1.2 m, 正上方开有小孔的密封箱内,用喷壶在小孔处少量多次地喷洒粉尘,并且擦拭系统 1、3 号电池片形成对照。



图 14 模拟扬尘试验

Fig. 14 Simulated dust emission test

2) 在校准之前,对积灰监测系统进行实验

校准前的测试数据如图 15 所示。可以看出,测量积灰数据 SR_o 与短路电流 I_{sc} 之比有较大偏差。

3) 校准后,对积灰监测系统进行实验

校准后积灰监测系统的测试数据如图 16 所示。可以看出,测量出的积灰数据相比于校准前,效果有了较大的改善。

4.2 户外试验

1) 试验方案

为了进一步测试积灰检测系统的测量精度,以及在户

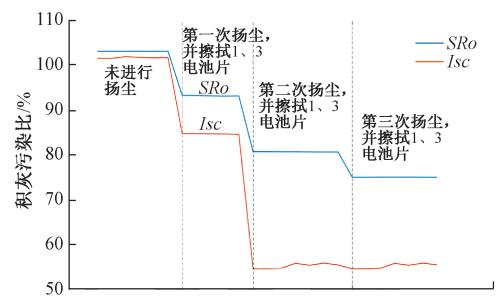


图 15 校准前的测量效果

Fig. 15 Measurement effect before calibration

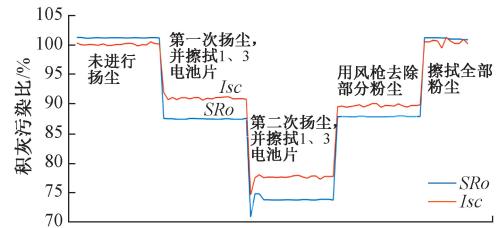


图 16 校准后的测量效果

Fig. 16 Measurement effect after calibration

外高温条件下对光伏电站的监测效果,本文在原有基础上改进人工扬尘的方法:配置定量浓度的粉煤灰溶液,该溶液成分包含空气中主要的灰尘种类^[17],在正午户外温度最高时,将其均匀喷洒在组件及积灰检测系统表面,并记录太阳辐射值、积灰污染比数值和发电量积灰损失实测值^[18],据检测当日户外最高温度为 39 ℃。扬尘试验对照效果如图 17 所示。



图 17 扬尘试验对照效果

Fig. 17 Comparison effect of dust test

2) 清洁状态下,积灰检测情况

试验前,清洁组件和积灰检测系统光伏玻璃表面灰尘,使积灰检测系统的积灰污染比数值回到 100%;归一化功率=实测组功率/参照组功率,表示清洁状态下块组件的发电量比例;可见数值波动范围在 0.726~0.748 之间,表明清洁状态下两块组件的发电量采集误差在 2% 左右(如表 1 所示)。

3) 扬尘试验

进行扬尘试验,试验具体数据如表 2 所示,在 13:00 水分蒸干后对应实测积灰污染比为 90.88%~93.64%,平均

表 1 清洁状态下的试验数据
Table 1 Test data in clean state

时间	试验组总直流功率/kW	参照组总直流功率/kW	总辐射/(W/m ²)	归一化系数	积灰 1	积灰 2	积灰 3	某同类型产品
11:25	0.584	0.783	846.766	0.746	100	100	100	100
11:30	0.582	0.788	858.909	0.739	100	100	100	100
11:35	0.595	0.799	874.053	0.745	100	100	100	100
11:40	0.592	0.815	880.533	0.726	100	100	100	100
11:45	0.593	0.796	870.003	0.745	100	100	100	100
11:50	0.589	0.808	874.864	0.729	100	100	100	100
11:55	0.594	0.794	887.014	0.748	100	100	100	100
12:00	0.584	0.783	846.766	0.746	100	100	100	100

值 92.26%;3 台积灰检测系统积灰污染比数据为 90.4%、93.79%、97.6%, 平均值为 93.93%;积灰检测系统与实测结果相差约为 1.67%。某同类型产品检测出的积灰污染

比数据平均值为 94.48%, 与实测结果相差约为 2.22%, 基本符合该产品 2% 的设计指标。与之相比积灰检测系统的检查结果的相对偏差降低了 0.55%。

表 2 扬尘试验数据

Table 2 Dust test data

时间	试验组总直 流功率/kW	参照组总直 流功率/kW	总辐射/ (W·m ⁻²)	参照组归一化 功率/kW		实测积灰污染		积灰 1/%	积灰 2/%	积灰 3/%	某同类 型产品
	k=0.726	k=0.748	k=0.726	k=0.748	%						
12:00	0.572	0.821	912.126	0.60	0.61	95.97	93.14	96.01	97.3	99.55	99.72
12:05	0.566	0.801	921.846	0.58	0.60	97.33	94.47	95.95	97.24	99.26	97.07
12:10	0.563	0.8	891.875	0.58	0.60	96.94	94.08	95.57	97.33	98.59	96.96
12:15	0.568	0.807	917.796	0.59	0.60	96.95	94.10	94.35	96.77	97.6	96.06
12:20	0.545	0.81	894.305	0.59	0.61	92.68	89.95	94.29	95.84	97.57	94.77
12:25	0.529	0.808	890.255	0.59	0.60	90.18	87.53	94.23	93.79	97.6	94.55
12:30	0.533	0.809	895.924	0.59	0.61	90.75	88.08	90.34	93.79	97.57	92.87
12:35	0.539	0.811	908.885	0.59	0.61	91.54	88.85	90.37	93.79	97.6	92.68
12:40	0.538	0.8	908.076	0.58	0.60	92.63	89.91	90.4	93.79	97.57	92.70
12:45	0.531	0.794	902.405	0.58	0.59	92.12	89.41	90.4	93.82	97.6	92.71
12:50	0.532	0.794	887.014	0.58	0.59	92.29	89.58	90.4	93.82	97.6	92.72
12:55	0.531	0.781	867.572	0.57	0.58	93.65	90.90	90.37	93.79	97.57	92.72
13:00	0.535	0.787	894.305	0.57	0.59	93.64	90.88	90.4	93.79	97.6	92.72
平均值				93.59	90.83	92.54	94.98	97.94	94.32		

4.3 实际案例应用

图 18 为 2023 年 12 月 26 日凌晨 0 点~上午 10 点, 于南京某集中式光伏电站接收的 3 组实地测试数据, 分别为本文设计的光伏积灰检测系统、某同类型产品与真实积灰

污染在外界温度 -5 ℃~10 ℃, 湿度 >45RH% 条件下的数据, 可以看出, 由于环境因素导致两种产品都出现了不同偏差, 前者约为 5.8%, 后者为 8.7%, 稳定性提高了 2.9%。

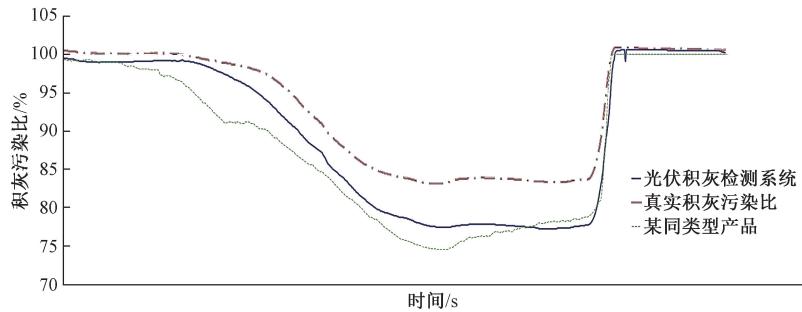


图 18 实地测试数据 1

Fig. 18 Field test data 1

图19为2024年1月25日~2024年3月5日,于山东聊城某集中式光伏电站接收的实地数据。从数据可以看出:监测过程中有5次变化分别为3次下降和2次上升,经过历史天气查询,分别对应着自然积灰与降雨清洗(绿色

背景)的过程。同时,系统可以在温度 $<-1^{\circ}\text{C}$,湿度 $>65\text{RH\%}$ 的环境下对光伏电站进行持续监测,多次观测到凝结冰霜状态下积灰变化,约为4%。

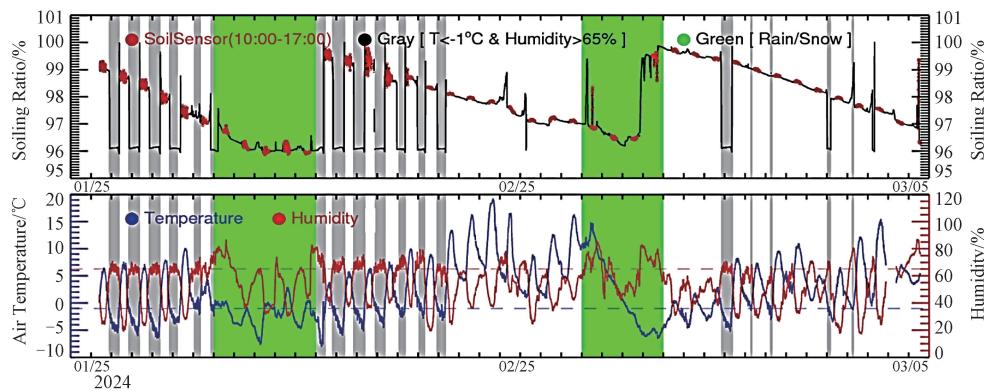


图19 实地测试数据2

Fig. 19 Field test data 2

5 结 论

本文设计并开发一种基于光散射原理的光伏组件积灰检测系统,该系统包括硬件和软件两部分,同时设计了一种新型检测方法与校准方法,优化了光路结构。多次扬尘试验结果表明:积灰检测系统的校准方法有效提高了检测精度,在户外高温条件下测量的积灰污染比数据与实测结果相差约1.67%,相较于传统设备,精度提高了0.55%,同时,在江苏南京与山东聊城某光伏电站的实地应用中,积灰检测系统在低温高湿条件下仍可进行长期有效监测,且稳定性较传统设备提高了2.9%。

综合上述实验,相比于传统设备,本文设计的光伏组件积灰检测系统有效提高了检测的精度,与此同时,系统集成的校准方法极大地降低了校准难度与成本,这对于降低光伏产业的运维成本有较大的帮助。并且系统在户外高温与低温高湿环境下仍可以稳定地进行长期有效监测,极大降低了温度与湿度对光学积灰检测方案的影响,有利于制定高效的光伏电站清洁运维策略,提高光伏电站运维效率。

参考文献

- [1] BORAH P, MICHELI L, SARMAH N. Analysis of soiling loss in photovoltaic modules: A review of the impact of atmospheric parameters, soil properties, and mitigation approaches[J]. *Sustainability*. 2023, 15(24): 16669.
- [2] ILSE K, MICHELI L, FIGGIS B W, et al. Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation[J]. *Joule*, 2019, 3(10): 2303-2321.
- [3] BESSA J G, MICHELI L, ALMONACID F, et al. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges and perspectives of current and potential strategies[J]. *IScience*, 2021, 24(3): 102165.
- [4] SMESTAD G P, GERMER T A, ALRASHIDI H, et al. Modelling photovoltaic soiling losses through optical characterization[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 58.
- [5] 张天红, 卢强, 李升. 光伏组件积尘状态的检测技术综述[J]. 太阳能, 2024(1): 63-69.
- [6] ZHANG T H, LU Q, LI SH. Detection techniques for PV modules accumulated dust state[J]. *Solar Energy*, 2024(1): 63-69.
- [7] HUSSAIN N, SHAHZAD N, YOUSAF T, et al. Study of soiling on PV module performance under different environmental parameters using an indoor soiling station[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 52(Part C): 102260.
- [8] MULLER M, MICHELI L, MARTINEZ-MORALES A A. A method to extract soiling loss data from soiling stations with imperfect cleaning schedules[C]. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE, 2017: 2881-2886.
- [9] TEUBNER J, KRUSE I, SCHEUERPFLUG H, et al. Comparison of drone-based IR-imaging with module resolved monitoring power data[J]. *Energy Procedia*, 2017, 124: 560-566.
- [10] MEHTA S, AZAD A P, CHEMMENGATH S A, et al. Deep solar eye: Power loss prediction and weakly supervised soiling localization via fully convolutional networks for solar panels[C]. 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision

- (WACV). IEEE, 2018: 333-342.
- [10] AÏSSA B, SCABBIA G, FIGGIS B W, et al. PV-soiling field-assessment of MarsTM optical sensor operating in the harsh desert environment of the state of Qatar[J]. Solar Energy, 2022, 239: 139-146.
- [11] JING H, KAI-LIN P, PENG L, et al. Numerical analysis of temperature and humidity effects on the reliability of high-power light emitting diode[C]. 2011 12th International Conference on Electronic Packaging Technology and High-Density Packaging. IEEE, 2011: 1-4.
- [12] BERGIN M H, GHOROI C, DIXIT D, et al. Large reductions in solar energy production due to dust and particulate air pollution[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2017, 4(8): 339-344.
- [13] 张俊超,熊利民,孟海凤,等.标准太阳电池标定值计量方法研究[J].计量学报,2017,38(2): 171-174.
ZHANG J CH, XIONG L M, MENG H F, et al. Research on the calibration method of reference solar cell[J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38 (2): 171-174.
- [14] 张俊杰.基于光电二极管检测电路的噪声分析与电路设计[J].电子测试,2016(6): 32-33.
ZHANG J J. Noise analysis and circuit design based on photodiode detection circuit[J]. Electronic Test, 2016(6): 32-33.
- [15] 杨行,杨嵩,刘艺.微弱信号锁相检测的电路研究[J].压电与声光,2015, 37(3): 529-532.
YANG H, YANG S, LIU Y. Research on weak signal detecting circuit with lock-in amplifier[J]. Piezo Electrics & Acoustooptic, 2015, 37(3): 529-532.
- [16] 罗海军,张晓华,杨鹏.基于电子开关式锁相放大器的微弱信号检测方法[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2016, 33(6): 174-179.
LUO H J, ZHANG X H, YANG P. A weak signal detection method based on electronic switching mode lock-in amplifier[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(6): 174-179.
- [17] 范思远,王煜,曹生现,等.积灰对光伏组件输出特性影响建模与分析[J].仪器仪表学报,2023(4): 83-91.
FAN S Y, WANG Y, CAO SH X, et al. Effect modeling and analysis of dust accumulation on output characteristics of photovoltaic modules[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023(4): 83-91.
- [18] 王胜捷,田瑞,郭枭,等.光伏组件积灰特性及其透射衰减规律研究[J].农业工程学报,2019, 35(22): 242-250.
WANG SH J, TIAN R, GUO X, et al. Dust accumulation characteristics and transmission attenuation law of photovoltaic modules [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 242-250.

作者简介

董嘉浩,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式技术、数字信号处理等。

E-mail:dongjiahao09@163.com

乔杰,讲师,博士,主要研究方向为嵌入式技术、数字信号处理、无线通信等。

E-mail:qiaojienj@163.com

王永,教授,博士,主要研究方向为气象探测技术研究和传感器开发。

E-mail:wy@ztweather.com

张锐,高级工程师,主要研究方向为新能源电站智能运维平台与技术研发。

E-mail:17755152106@163.com

冯姣(通信作者),副教授,硕士生导师,主要研究方向为数字信号处理、无线通信、机器学习等。

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