

# 光伏组件表面积灰监控系统设计与实现

王亚军<sup>1</sup>, 王淑娴<sup>2</sup>, 朱重阳<sup>2</sup>, 杨黎晖<sup>2</sup>

(1. 陕西榆林能源集团, 陕西 榆林 719000; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 光伏组件表面积灰会影响组件的发电效率, 降低光伏电站运行的经济性。为了能够监测光伏电站中组件表面的积灰状态, 进而基于监测数据进行光伏电站清洗运维优化方法的研究, 提出一种光伏电站组件表面积灰监控系统。该系统中, 下位机采用 STM32F407 微处理器扩展 ADS1256 模数转换器采集与积灰相关的多种传感器信号, 并通过无线传输模块将数据传给上位机监控软件。基于 LabVIEW 开发的上位机监控软件通过串口接收数据, 处理并存储数据后, 根据相应数据对光伏电站的清洗时间进行优化。经过实验测试, 本系统能够准确地采集、传输、处理和储存数据, 监测光伏电站组件表面的积灰状态并实现电站清洗时间的规划, 对光伏电站清洗运维优化有重要意义。

**关键词:** 光伏组件; 积灰; 监控系统; 数据采集; 清洗运维优化

## Design and implementation of monitoring and control system for dust deposition on the surface of photovoltaic module

WANG Yajun<sup>1</sup>, WANG Shuxian<sup>2</sup>, ZHU Chongyang<sup>2</sup>, YANG Lihui<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Yulin Energy Group, Yulin 719000, China;

2. School of Electrical Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The power generation efficiency of the photovoltaic (PV) modules can be affected by the dust deposition on the surface of modules, which can also reduce the economy of PV power plant operation. In order to monitor the dust deposition status on the surface of modules in PV power plants and carry out the research on optimization methods for cleaning scheduling of PV power plants based on the monitoring data, a monitoring and control system for dust deposition on the surface of PV module is proposed. In this system, the STM32F407 microprocessor expanding the ADS1256 analog-to-digital converter is used for lower computer to sample various sensor signals related to dust deposition, and the data are transmitted to the upper computer monitoring software through wireless transmission modules. The upper computer monitoring software developed based on LabVIEW can receive data through a serial port, process and store the data, and optimize the cleaning schedule of the PV power plant based on the corresponding data. Experimental test results show that the proposed system can accurately sample, transmit, process, and store data, and can monitor the dust deposition status on the surface of PV modules, then achieve the cleaning scheduling of PV plant, which is of great significance for the optimization of PV power plant cleaning scheduling.

**Key words:** photovoltaic module; dust deposition; monitoring and control system; data sampling; cleaning scheduling

0 引言

在光伏电站中，光伏组件长期暴露在空气中，其表面积灰会对太阳辐射产生遮挡效应。已有研究指明，光伏组件表面积灰严重时会导致组件发电效率降低40%<sup>[1]</sup>，然而大型光伏电站频繁清洗又会增加电站的运行成本。因此，监测光伏组件表面的积灰状态，并基于监测数据规划光伏电站的清洗时间，降低积灰带来的发电量损失，对于大型光伏电站尤其是荒漠地区电站的经济运行具有重要意义。

为解决光伏组件表面积灰状态监测难题，学者们做了大量研究，文献[2]提出了一种基于单片机与人机交互界面开发的光伏电站环境参数监测系统，实现了无人值守情况下光伏电站环境参数的监控。文献[3]提出了一种基于物联网的光伏组件积灰监测系统，有效监测积灰状态，从而得到积灰对光伏组件输出功率与发电效率的影响结果。文献[4]通过现场实验，实时监测光伏组件的运行参数，得到光伏组件积灰状态电功率损失率渐进型预测模型，并提出光伏电站最佳清洗周期优化方法。在现有针对光伏组件表面积灰状态的研究中，大多仅停留在对光伏组件运行和环境参数监测层面，很少对积灰程度做量化分析并进行清洗规划。另外，关于清洗时间规划的研究大多未考虑实际运行中积灰过程受环境影响出现的随机性，通常只计算固定的最佳清洗周期，而缺少更精细化的规划。

本文提出一种光伏电站组件表面积灰监控系统，该系统能够实现光伏组件电压电流、辐照度和温湿度数据的实时采集，基于采集到的数据监测组件表面的积灰情况，并根据积灰状态对电站的清洗时间进行动态的规划。

1 监控系统总体结构

光伏电站组件表面积灰监控系统主要由下位机监测系统和上位机监控软件两部分构成。下位机监测系统主要用于采集和向上位机传输与光伏组件表面积灰相关的数据。上位机监控软件安装

在工控机上，主要用于处理并存储从下位机接收的数据，进行电站清洗时间的规划，同时还具有向下位机发送控制指令、故障报警和历史数据查询等功能。监控系统的总体架构如图1所示，系统的整体控制逻辑如图2所示。

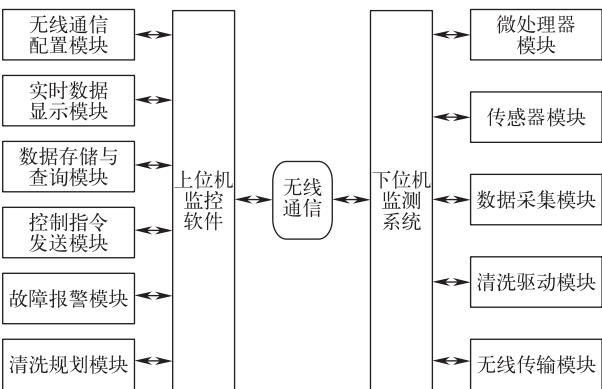


图 1 光伏电站组件表面积灰监控系统总体架构  
Fig. 1 The overall architecture of the monitoring and control system for dust deposition on the surface of photovoltaic module

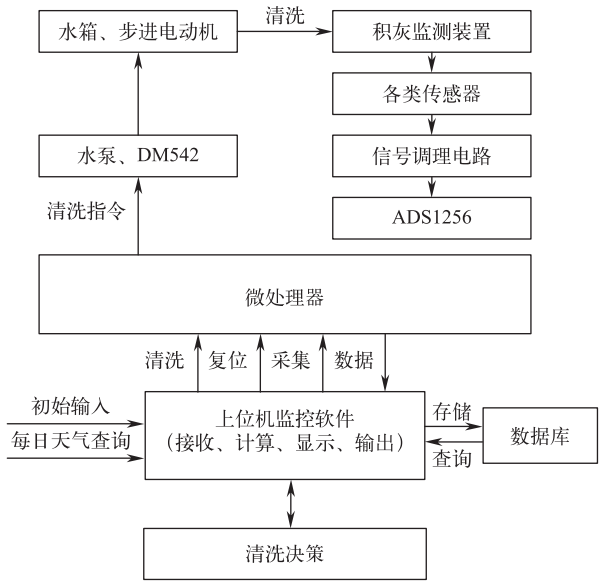


图 2 光伏电站组件表面积灰监控系统控制逻辑  
Fig. 2 The control logic of the monitoring and control system for dust deposition on the surface of photovoltaic module

2 下位机监测系统设计

2.1 下位机总体设计方案

下位机监测系统主要包括光伏组件表面积灰

检测装置和数据采集及传输装置。

光伏组件表面积灰检测装置主要由两块尺寸、特性一致的光伏组件和组件清洗装置构成。两块光伏组件分别反映清洁工况和积灰工况。清洁工况组件每天在采集数据前由组件清洗装置自动完成清洗，因此在采集数据时可认为其未积灰。积灰工况组件与电站其他组件一样正常积灰，在对电站进行清洗的同时，可通过人工在上位机软件的操作由组件清洗装置完成对其清洗。光伏组件清洗装置由水箱、水泵、喷淋头及带雨刷的滑台模组组成，用于完成对清洁工况/积灰工况组件的自动清洗。数据采集及传输装置主要由各类信号传感器、ADS1256模数转换模块及无线通信模块组成，主要用于各类信号的采集及与上位机的通信。下位机监测系统的实物图如图3所示。



图3 下位机监测系统实物图

Fig. 3 Physical image of the lower computer monitoring system

## 2.2 硬件系统设计

### 2.2.1 微处理器

根据系统各模块功能规划及应用需求，选用基于Cortex-M4内核的STM32F407ZGT6单片机作为下位机监测系统中的微处理器。STM32F407ZGT6集成了192 KB的片内SRAM、1 024 KB的FLASH、定时器、UART、I/O接

口、SPI等外围电路，可满足本系统数据采集、控制驱动以及数据传输的需求<sup>[5]</sup>。

### 2.2.2 传感器模块

下位机监测系统主要实现对电压、电流、辐照度、温度、湿度及水位信号的采集，选用的各信号传感器型号见下表。

表 各类传感器型号

Tab. Various sensor models

| 传感器名称 | 型号             |
|-------|----------------|
| 电压传感器 | CHVS-EV-50PIO5 |
| 电流传感器 | CHCS-ITH-20S   |
| 温度传感器 | DS18B20        |
| 湿度传感器 | TS-FTM02       |
| 辐照仪   | CMP-3          |
| 水位传感器 | Liq-136        |

电压传感器CHVS-EV-50PIO5测量电压范围 $\pm 50$  V，输出 $\pm 5$  V的电压信号，具有高准确度、高线性度、体积小和稳定的特点；电流传感器CHCS-ITH-20S测量电流范围为0~20 A，输出0~40 mA的电流信号，准确度 $\pm 0.05\%$ 。通过对光伏组件输出电压和电流的测量，可得到光伏组件瞬时输出功率，用于计算光伏组件发电效率损失率，实现对积灰状态的监测。

温度传感器DS18B20测温范围为 $-55 \sim +125$   $^{\circ}\text{C}$ ，具有高准确度、体积小特点，仅需一条数据线即可与微处理器进行双向通信。通过对光伏组件背板温度的测量，采用功率温度系数将光伏组件瞬时输出功率转换成额定工作条件下的功率，修正温度的影响。

湿度传感器TS-FTM02测量范围为0~100%RH，测量准确度为 $\pm 3\%$  RH，输出0~5 V的电压信号，便于数据的采集。辐照仪CMP-3可测量的范围为0~2 000  $\text{W}/\text{m}^2$ ，典型的灵敏度为10  $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ，年稳定性高于1%，输出0~30 mV的电压信号。采集环境湿度和辐照度数据，用于在预测积灰引起的组件发电效率损失率时表征影响每日发电效率损失率的特征。

水位传感器Liq-136可测量的范围为0~1 m，线性输出4~20 mA的电流信号，测量准确度

0.5%。通过采集水箱的水位高度，可以在水箱水位过低时及时发出水位过低报警信号，提醒电站运维人员添水。

2.2.3 数据采集模块

STM32F4自带12位逐渐逼近型的模数转换器，因为本系统对电压、电流信号的采集准确度要求高，所以选用TI公司推出的8通道模数转换器ADS1256，其24位模数转换器具有高速、高准确度数据采集的优点。

ADS1256可同时采集8路信号输入，输入电压范围为0~5 V。由于电流传感器和水位传感器输出为电流信号，辐照仪输出为0~30 mV的电压信号，因此针对电流采样信号设计了电流采样与电压跟随电路，针对辐照仪输出的电压采样信号设计了电压放大及电压跟随电路，上述信号调理电路的原理如图4所示。图4中，运算放大器选用LM358，针对电流传感器和水位传感器输出的电流采样信号，分别选取500 Ω和200 Ω的电流采样电阻。通过RC滤波电路输出满足ADS1256输入电压范围的电压信号。

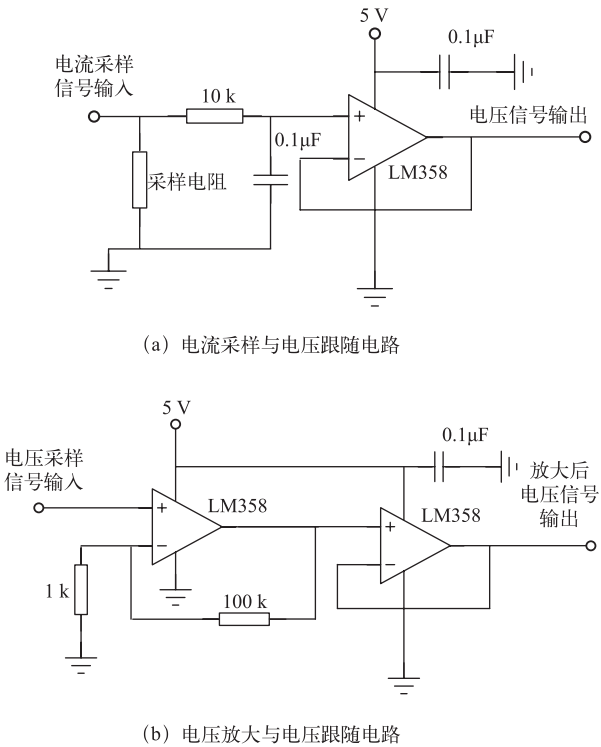


图4 信号调理电路原理图  
Fig. 4 Signal conditioning circuit principle diagram

2.2.4 清洗驱动模块

组件清洗装置的清洗驱动部分选用57步进电动机滑动模组和DM542步进电动机驱动器。通过继电器控制水泵喷水。步进电动机滑动模组带动雨刷移动，并与水泵喷水相配合完成对光伏组件的清洗。

2.2.5 无线传输模块

为便于上下位机的数据传输，采用N7X无线自组网模块，该模块带有自动路由功能，使用UART串行通信协议，通过RXD和TXD两根线实现异步全双工通信。用户可通过上位机软件自行设置串口、传输频道和发射功率等参数。通过该模块，可以在上下位机之间快速准确地传输无线数据与指令。

2.2.6 硬件系统接线

硬件系统的接线如图5所示。

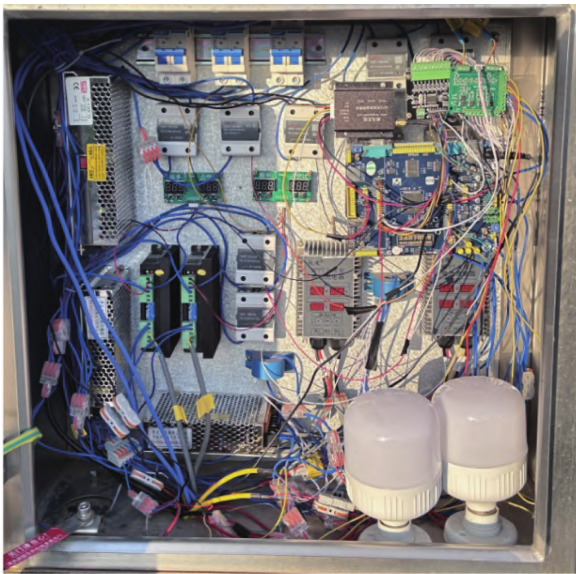


图5 硬件系统接线图  
Fig. 5 Hardware system wiring

2.3 软件系统设计

2.3.1 清洗驱动程序

当上位机监控软件通过无线通信模块向下位机发送清洗指令后，下位机清洗驱动程序驱动水泵喷水、带雨刷的步进电动机滑动模组动作，完成清洁工况/积灰工况组件的清洗。下位机清洗驱动程序的流程图如图6所示。

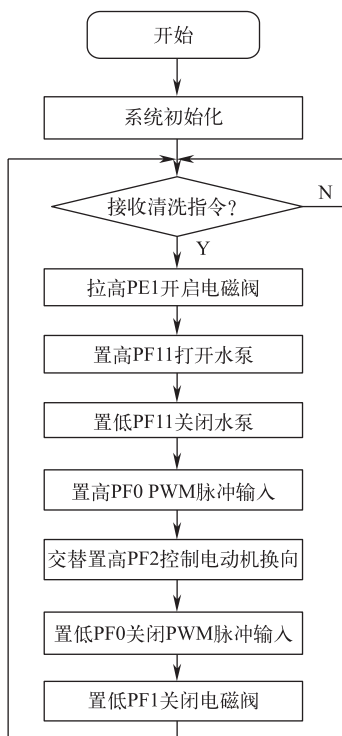


图 6 清洗驱动程序流程图

Fig. 6 Cleaning driver flow chart

### 2.3.2 数据采集程序

下位机数据采集程序通过单总线采集 DS18B20 的温度数据，同时对 ADS1256 输入的 8 路信号进行采样，并转换得到实际的电压、电流、辐照度、湿度和水位数据。下位机数据采集程序的流程图如图 7 所示。

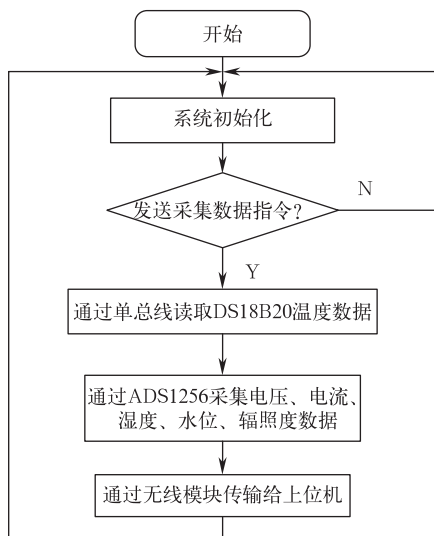


图 7 数据采集程序流程图

Fig. 7 Data collection program flow chart

### 2.3.3 下位机主程序

下位机主程序综合实现各个功能子模块的功能。下位机主程序的流程图如图 8 所示。

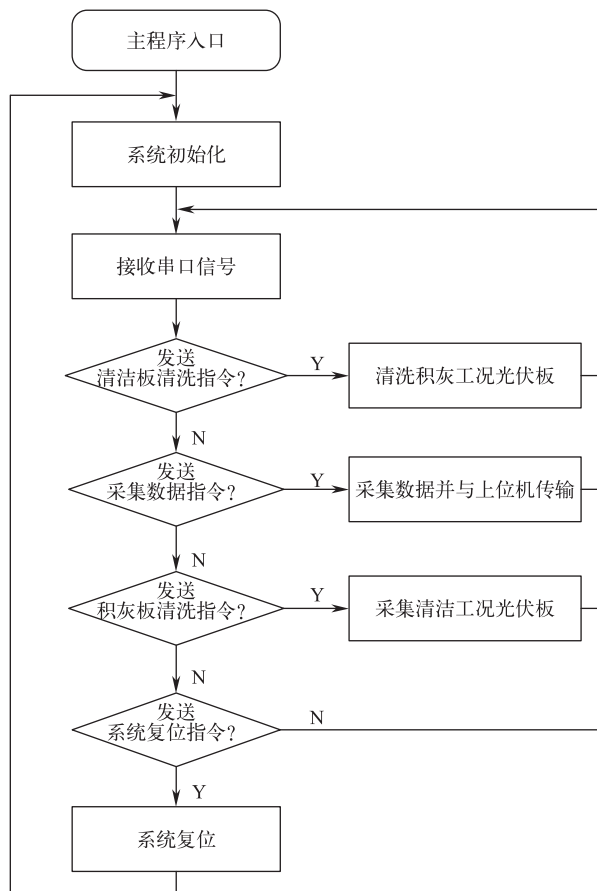


图 8 主程序流程图

Fig.8 Main program flow chart

## 3 上位机监控软件设计

基于 LabVIEW 开发的上位机监控软件安装在工控机上<sup>[6]</sup>，本系统选用型号为 IPC-610L 的研华工控机。上位机监控软件主要包括无线通信配置、实时数据显示、数据存储与查询、控制指令发送、故障报警和清洗规划等功能模块。

### 3.1 无线通信配置模块

无线通信配置模块用于配置无线通信的端口号、波特率、数据位、停止位以及奇偶校验位等相关参数，只有参数设置与下位机相匹配，才能顺利实现上下位机之间的数据传输和指令传递<sup>[7]</sup>，无线通信配置界面如图 9 所示。



图 9 无线通信配置界面  
Fig. 9 Wireless communication configuration interface

3.2 实时数据显示模块

在实时数据显示模块中，选用波形图表的方式显示实时采集到的清洁组件和积灰组件的输出功率数据，选用仪表盘显示清洁组件和积灰组件的温度、湿度以及辐照度数据。实时数据显示界面如图10所示。

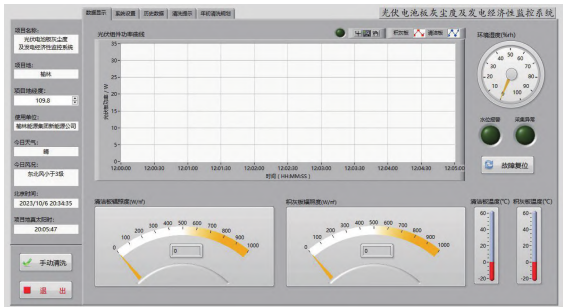


图 10 实时数据显示界面  
Fig. 10 Real-time data display interface

3.3 数据存储与查询模块

数据存储与查询是上位机软件需要实现的一项重要功能，本系统选用ACCESS数据库存储数据，主要通过LabVIEW的Database工具包，利用DB Tools Insert Data等函数向数据库中对对应表写入数据。

通过LabVIEW的Create Data Link工具，建立数据库与LabVIEW的链接，生成扩展名为udl的数据链接文件，再通过DB Tools Select Data等函数读取数据库信息并显示<sup>[8]</sup>，以实现数据查询功能。数据查询界面如图11所示。



图 11 数据查询界面  
Fig. 11 Data query interface

3.4 控制指令发送模块

下位机清洗、采集等功能的启动是靠上位机发送控制指令，再由下位机接收、读取并执行对应指令而实现的。上位机监控软件通过串口的无线通信向串口的写入缓冲区写入对应的控制指令并发送给下位机。

3.5 故障报警模块

为了在系统运行异常时及时通知运维人员来处理，监控软件中还设计了故障报警功能。该功能主要针对水位过低与数据采集异常进行报警。当下位机监测系统通过水位传感器检测到用于组件清洗的水箱水位低于用户设定的水量阈值时，上位机监控软件主界面的水位报警故障灯会点亮，以此来提示用户及时给水箱添水。如果上下位机之间的通信出现问题，无法正确将数据从下位机传输到上位机，上位机监控软件主界面的采集异常指示灯会点亮，提示用户数据采集出现错误，需要及时排查。当处理完故障后，按下主界面的故障复位按钮即可恢复系统正常运行。此外，针对故障报警功能，本系统还加入了SIM800C模块<sup>[9]</sup>，当出现异常情况后，监控软件会向运维人员手机发送故障信息短信，提示运维人员及时处理。故障报警界面如图12所示。



图 12 故障报警界面  
Fig. 12 Fault alarm interface

### 3.6 清洗规划模块

清洗规划模块根据采集到的与组件表面积灰相关的数据,对积灰引起的组件发电效率损失率进行预测,并计算积灰带来的电站经济损失,进而采用优化方法对电站的清洗时间进行规划并给出清洗提示。同时,考虑到电站的实际运行情况,还设计了三种决策方式(按时清洗、放弃清洗和推迟清洗),供运维人员在系统发出清洗提示后进行清洗决策选择。清洗规划界面如图13所示。

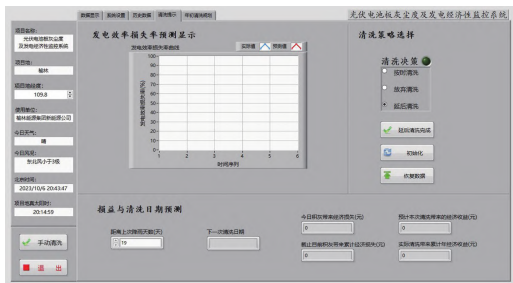


图 13 清洗规划界面

Fig. 13 Cleaning planning interface

## 4 实验测试

将设计并实现的光伏组件表面积灰监控系统放置于陕北某光伏电站运行,实际运行数据显示,该系统可长时间稳定运行且能实现设计功能。

下位机采集到的实时数据如图14所示。上位机进行数据存储与查询的结果如图15所示。

当下位机出现采集异常或水箱水位过低时,上位机软件故障报警灯亮,如图16所示,报警短信如图17所示。

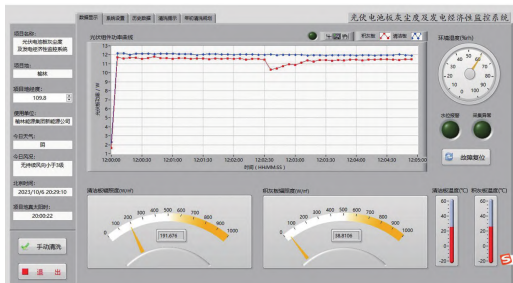


图 14 运行中实时数据显示界面

Fig. 14 Real-time data display interface in running



图 15 运行中数据存储与查询界面

Fig. 15 Data storage and query interface during operation



图 16 运行中出现故障时报警界面

Fig. 16 The alarm interface when there is a failure during operation

Data collection fails, please handle it in time!

Data collection fails, please handle it in time!

图 17 故障后发送报警短信

Fig. 17 Send an alarm SMS after the fault

通过清洗规划模块对电站清洗日期进行规划的结果如图18所示。

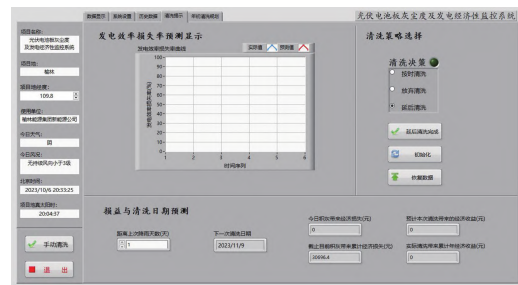


图 18 清洗规划结果

Fig. 18 Cleaning planning results

## 5 结束语

本文提出了光伏电站组件表面积灰监控系统。该系统的下位机采用STM32F407单片机控制光伏组件清洗驱动模块、数据采集模块和数据传输模块协调工作,可以有效监测光伏电站中组

件表面的积灰状态。系统上位机监控软件可实现与积灰相关数据的接收、处理、实时显示和存储，此外还具有发送控制指令、故障报警、清洗时间规划和提示的功能。实验测试结果表明，本系统能够稳定地实现上位机监控软件和下位机监测系统之间的无线通信，准确地采集、传输、处理和储存相关数据，并实现监测光伏电站组件表面积灰状态及电站清洗时间规划的功能。

参考文献

[1] 张姝伟. 基于视觉的光伏板积灰状态监测与性能评估[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.

[2] 莫康信, 李延峰, 王智聪. 光伏电站环境监测系统的设计与实现[J]. 工程技术研究, 2019, 4(9): 4-6.

[3] 杜瑞冰. 光伏电池板积尘监测系统设计[D]. 保定: 河北大学, 2020.

[4] 赵波, 张姝伟, 曹生现, 等. 基于状态监测的电池板积灰清洗周期确定与费用评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4205-4213.

[5] 郑蕊, 王晓荣, 吴棋, 等. 基于STM32F4大气监测系统微站的软硬件设计[J], 仪表技术与传感

器, 2020(9): 98-100, 105.

[6] 郝遥迪, 刘承波, 尚付磊, 等. 基于LabVIEW的列车牵引控制器数据监视软件设计[J]. 电气应用, 2021, 40(8): 75-81.

[7] 沈杨帆, 鲍建新, 赵新未. 基于LabVIEW的车间环境无线监测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2017(9): 83-87.

[8] 陆晓, 包晓敏, 饶照明. 基于LabView的数据记录及数据库访问技术[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2019, 37(2): 201-205.

[9] 李建杰, 杨延宁, 孙宇航, 等. 一种基于SIM800C通信模块的远程防盗报警器设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(23): 130-133, 138.

作者简介

王亚军（1981—），男，工程师，在职博士研究生，研究方向为新能源电力与储能。

王淑娴（1999—），女，硕士研究生，研究方向为光伏电站智能运维系统。

（收稿日期：2023-11-29）