

# 基于北斗定位优化的太阳能发电和水循环储热系统设计

曹建新, 向进, 叶鑫, 吴思慧, 王莹莹, 韩崇

徐州工程学院物理与新能源学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2024年7月29日; 录用日期: 2024年8月22日; 发布日期: 2024年8月30日

## 摘要

光照强度和工作温度是影响光伏板发电效率的关键因素。目前, 社会普遍采用追踪太阳光线以及洒水降温方法来提高光伏发电效率。但是, 洒水降温的方式不可避免地会导致水资源的严重浪费, 同时, 传统的压差式追光方法易受云层阴影等干扰而不能准确追踪太阳光线。基于以上两个问题, 本文提出了一种基于北斗定位优化的光伏发电和水循环降温储热系统。为高效追踪太阳光线, 本文提出了一种基于北斗系统优化的追踪方案。该系统利用北斗高精度定位模块获取装置所在地的经纬度及协调世界时(Universal Time Coordinated, UTC), 通过天文算法计算出太阳高度角及方位角, 确定太阳位置, 并利用双轴二维云台控制光伏板运动, 实现每一时间下太阳光线对光伏板的垂直照射; 为有效解决降温问题, 本文提出了一种封闭循环水路结合相变材料降温的方法, 以单片机为主控系统实现对光伏板工作温度的反馈式调节, 能够有效节约水资源并高效控制光伏板工作温度。与此同时, 系统将光伏板热量存储在相变材料石蜡中, 可以再用于日常居民的热水供应, 减少碳排放。经过验证, 该综合系统的性能指标完全满足实用需求, 运行稳定可靠。

## 关键词

光伏发电, 北斗定位, 单片机, 相变储热

# Design of Solar Power Generation and Water Cycle Heat Storage System Based on Beidou Positioning Optimization

Jianxin Cao, Jin Xiang, Xin Ye, Sihui Wu, Yingying Wang, Chong Han

School of Physics and New Energy, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu

Received: Jul. 29<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Light intensity and operating temperature are the key factors that affect the efficiency of photovoltaic panels. At present, the society generally uses the sprinkler cooling and tracking the sun to improve the efficiency of photovoltaic power generation, but the sprinkler cooling method will inevitably lead to a serious waste of water resources, at the same time, the traditional pressure differential light tracking method is vulnerable to cloud shadows and other interference and can not accurately track the sun. Based on the above two problems, this paper proposes a photovoltaic power generation and water cycle heat storage system based on Beidou positioning optimization. In order to track solar rays efficiently, a tracking scheme based on the optimization of the Beidou System is proposed in this paper. The system uses the Beidou high-precision positioning module to obtain the longitude and latitude and Universal Time Coordinated (UTC) of the location of the device, calculates the sun altitude Angle and azimuth Angle through astronomical algorithms, determines the sun position, and uses the two-axis two-dimensional head to control the motion of the photovoltaic panel, to achieve the vertical irradiation of solar rays on photovoltaic panels at every time. In order to effectively solve the cooling problem, this paper presents a method of closed circulation waterway combined with phase change material cooling, which uses single-chip microcomputer as the main control system to realize the feedback adjustment of the working temperature of photovoltaic panels, which can effectively save water resources and efficiently control the working temperature of photovoltaic panels. At the same time, the system stores photovoltaic panel heat in phase change material paraffin wax, which can be reused for hot water supply to daily residents, reducing carbon emissions. The design has been verified that the performance indexes of the integrated system fully meet the practical requirements, and the operation is stable and reliable.

## Keywords

Photovoltaic Power, Satellite Positioning, SCM, Phase Change Thermal Storage

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

太阳能是一种清洁、高效且永不衰竭的新型能源，具有十分广阔的应用前景[1]。目前，对太阳能最有效的利用方式为光伏发电，然而光伏发电系统易受光照强度及工作温度等因素影响，从而使得光伏发电的效率受到限制[2]。

追光系统是一种用于优化太阳能收集的技术。它通过调整太阳能电池板或集热器的位置，确保其始终对着太阳，从而最大化光伏面板或太阳能集热器接收到的太阳辐射量。这种系统在太阳能发电和热能收集领域具有重要意义[3]。目前，我国也对自动追光系统进行了深入的研究，其中，光电追踪方式受到了广泛的应用，该方式具有高光敏感度、构造简单、适合量产等优点，但是其难以适应复杂的气象状况，遇到光强较弱的天气或较厚的云层时，会引起执行机构的错误运行。

面对光伏板的降温问题，主要的降温方式有反射涂层、散热材料、风扇降温、喷雾降温等，但是以上方式具有技术复杂、成本高、效率低、可靠性差、折损光伏组件寿命等缺点。

本设计从光伏发电的光照条件及温度条件两个方面加以优化，在保证系统可靠性及低成本的同时能

够有效提高光伏发电效率。

## 2. 太阳追踪方法及水循环设计方案

### 2.1. 太阳追踪方法与基本原理

该部分介绍的控制方法是基于北斗定位模块的以程序角度计算为基础的控制策略。主要由：北斗高精定位模块、单片机、角度位移传感器、双轴二自由度云台等部分构成。图 1 为太阳追踪方案。

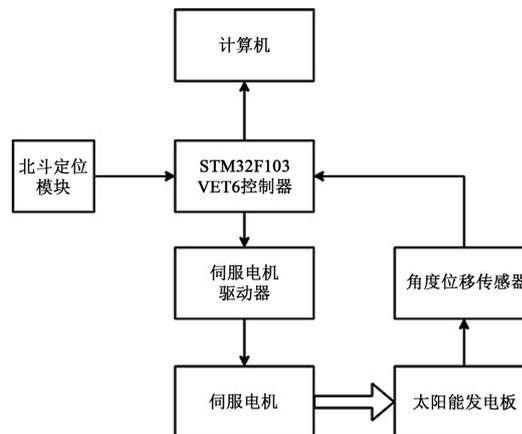


Figure 1. Sun tracking scheme  
图 1. 太阳追踪方案

#### 2.1.1. 太阳高度角、方位角计算

本文将太阳位置分解为高度角及方位角。要计算太阳的两个角，第一步为计算赤纬角  $\delta$ ，赤纬角每年呈现周期性变化，其计算公式如公式 1 [4]：

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \sin \beta + 1.1149 \sin 2\beta - 0.1712 \sin 3\beta - 0.7580 \cos \beta + 0.365 \cos 2\beta + 0.0201 \cos 2\beta \quad (1)$$

其中： $\beta = 2\pi(n-1-n_0)/365.2422$

$$n_0 = 78.801 + 0.242(y-1969) - f[0.250(y-1969)]$$

在公式中， $n$  是由日期转化来的，代表从一月一号开始到所求日期的天数。 $y$  是所在的年份。

计算太阳角度的第二步是计算当地经度与赤经之差，因为我们在公式中所用的时间都是以真太阳表示，与日常使用的时间有一定的差别，当地经度  $\lambda$  与赤经  $\lambda_D$  之差的计算公式见公式(2) [4]：

$$\lambda - \lambda_D = 15^\circ(t+e-12) + (\lambda - \lambda_h) \quad (2)$$

其中： $e = (0.0028 - 1.9857 \sin \beta + 9.9059 \sin 2\beta - 7.0924 \cos \beta - 0.6882 \cos 2\beta)/60$

式中， $t$  为当地时间， $e$  为均时差， $\lambda_h$  为所在时区的基准精度，我国以北京时间为标准时间，东八区  $\lambda_h = 120^\circ$ 。

第三步是计算太阳时角  $\omega$ ，计算公式为(3) [4]：

$$\omega = \begin{cases} \lambda - \lambda_D - 360^\circ & \lambda - \lambda_D > 180^\circ \\ \lambda - \lambda_D & -180^\circ \leq \lambda - \lambda_D \leq 180^\circ \\ \lambda - \lambda_D + 360^\circ & \lambda - \lambda_D < -180^\circ \end{cases} \quad (3)$$

正午时  $\omega < 0^\circ$ ，正午至午夜  $\omega > 0^\circ$ ，时角范围为  $-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$ 。

第四步为计算太阳高度角及方位角。一般来说，太阳入射的光线与地面的投影夹角定义为高度角，用  $H$  表示。太阳能电池板与太阳连线投影到地面上与南北方向之间的夹角定义为方位角，用  $V$  表示。太阳高度角  $H$  及方位角  $V$  可由公式(4) [4] [5]确定：

$$\begin{cases} H = \arcsin(\cos \varphi \cos \lambda \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) \\ V = \frac{\sin \omega \arccos(\sin H \sin \varphi - \sin \delta)}{\cos H \cos \varphi} \end{cases} \quad (4)$$

其中： $\varphi$  为本地纬度， $\delta$  为赤纬角， $\omega$  为太阳时角。

图 2 为太阳高度角及方位角示意图：

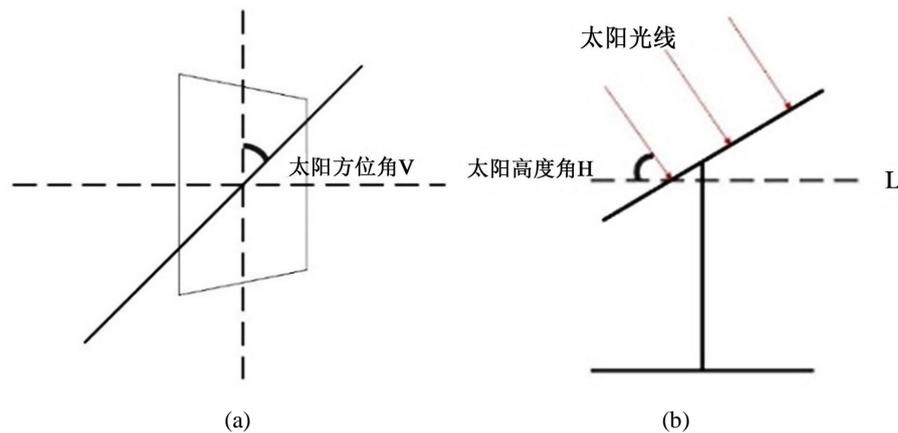


Figure 2. (a) Schematic diagram of the sun's azimuth; (b) Schematic diagram of the sun's altitude angle  
图 2. (a) 太阳方位角示意图；(b) 太阳高度角示意图

### 2.1.2. 机械控制原理

该部分以 STM32 系列单片机为主控，实现太阳自动跟踪控制的程序。本系统主要分为以下步骤：每隔时间  $t$  (min) 后，北斗模块获取设备所在地的经纬度坐标及时间参数；单片机对所获得的经纬度坐标及时间参数计算出该地当前时间的太阳高度角和方位角(如果读取本地时间为本地日落后，则不进行任何操作。)；STM32 单片机利用计算得到的高度角和方位角数据与上一状态的高度角方位角数据进行对比，控制双轴伺服电机完成对太阳的跟踪动作。控制原理如图 3 所示：

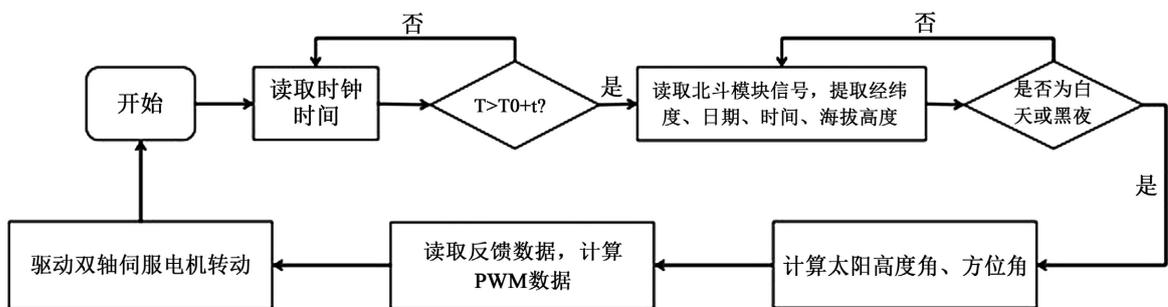


Figure 3. Mechanical control principle  
图 3. 机械控制原理

## 2.2. 循环水路及相变材料降温

### 2.2.1. 循环水路结构

为高效降低光伏板温度并避免水资源浪费问题，本文提出了一种封闭循环水路降温方式，通过水泵驱动封闭路径中的水流，使水路中的水能够循环使用。此外，在水路降温部分，使用光伏板—导热硅脂—水冷头—铝箔隔热层结构，提高热传导效率。图 4 为循环水路示意图，图 5 为降温部分结构示意图。水冷头安装在光伏板的背面，通过循环流动的水将光伏板表面产生的热量传递，并将其传递到相变材料石蜡中。石蜡通常具有较高的相变潜热，即在相变过程中吸收或释放的热能。当相变材料受到温度变化的影响时，它会在特定的温度范围内发生相变，从一种相态转变为另一种相态。在相变过程中，石蜡会吸收或释放大量的热能，从而实现热能的储存或释放[6]。因此相变材料石蜡可以储存大量的热量，在需要时将其释放出来，实现热能的有效利用。

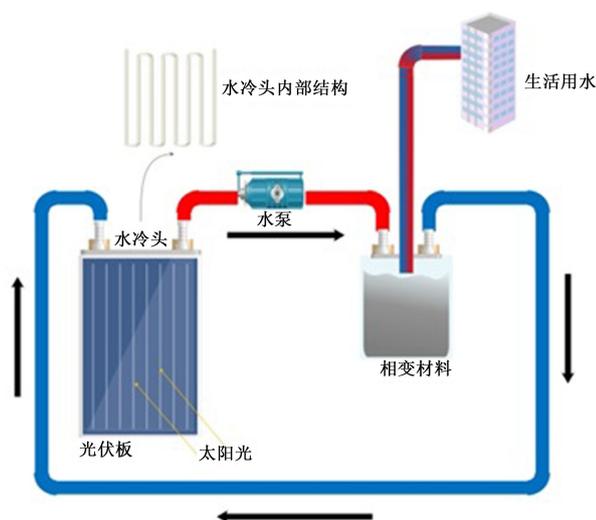


Figure 4. Schematic diagram of circulating waterway

图 4. 循环水路示意图

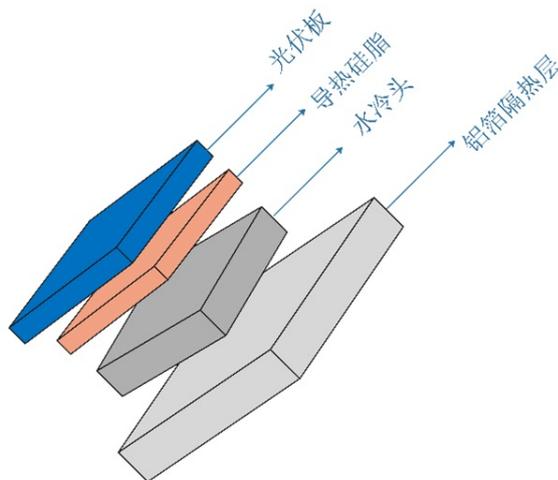


Figure 5. Structure diagram of the cooling

图 5. 降温部分结构示意图

### 2.2.2. 循环水路工作方式

本设计在不改变太阳能光伏板基本结构的前提下，在太阳能光伏板背面增加光伏板 - 导热硅胶 - 水冷头 - 铝箔复合散热结构作为水冷散热装置。温度传感器实时检测光伏板表面温度并传输给单片机，单片机利用温度参数对循环水路系统做闭环控制，对光伏板表面温度进行反馈式调节。图 6 循环水路结构图。

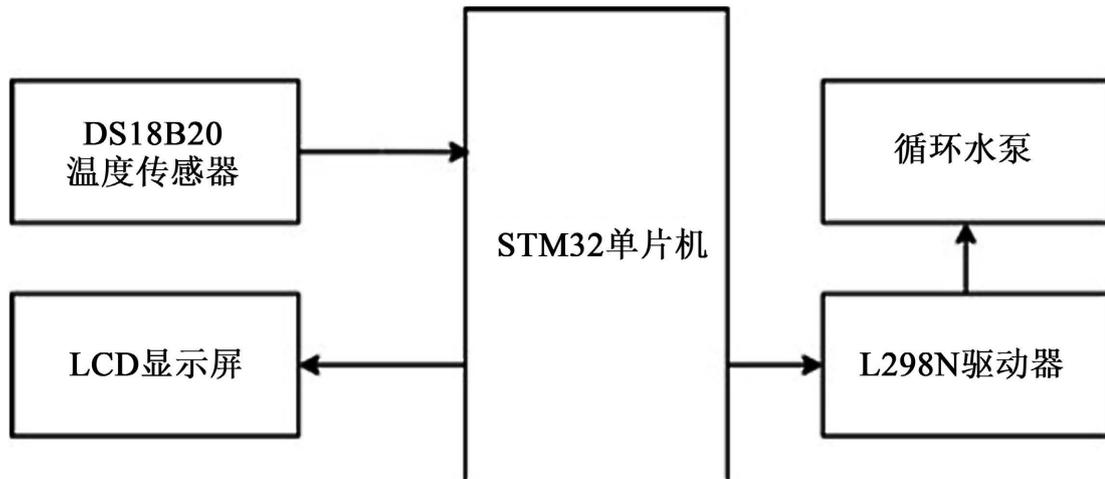


Figure 6. Circular waterway structure  
图 6. 循环水路结构

## 3. 综合性能分析

### 3.1. 对追光部分的理论计算

太阳辐射光线与固定太阳能光伏板法线方向存在一定的角度，因此考虑设计一个能自动旋转的太阳能光伏板，以达到能使太阳辐射光线与太阳能光伏板法线方向时刻处于平行的状态。

令  $t_i$  为第  $i$  月份的日照时数，本文考虑将某月的日平均日照时数作为该月每日的日照时数。且令  $t_{ii}$  为第  $i$  个月的日平均日照时数。现不考虑旋转模型，各个月太阳能光伏板的能量接收量  $Q_1$ ：

$$Q_1 = n_i \int_{(24-t_i)/2}^{(24-t_i)/2+t_i} \eta I_0 \cos^2 \varphi(t) dt \quad (5)$$

其中  $n_i$  为第  $i$  个月份的天数， $\eta$  为光伏板的发电效率。若考虑旋转模型，则各个月太阳能光伏板的能量接收量  $Q_2$ ：

$$Q_2 = n_i \int_{(24-t_i)/2}^{(24-t_i)/2+t_i} \eta I_0 \cos \varphi(t) dt \quad (6)$$

令引入旋转模块后太阳能光伏板的电转换效率提高了  $\mu$ ：

$$\mu = (Q_2/Q_1 - 1) \cdot 100\% \quad (7)$$

通过 LINGO 计算得到  $\mu$  的值为 16.64%。

### 3.2. 对水冷降温系统的理论计算

本设计以单晶硅太阳能光伏板为例，在日光下对太阳能光伏板进行照射，图 7 为引入水冷系统与未引入水冷系统光伏板的温度情况。

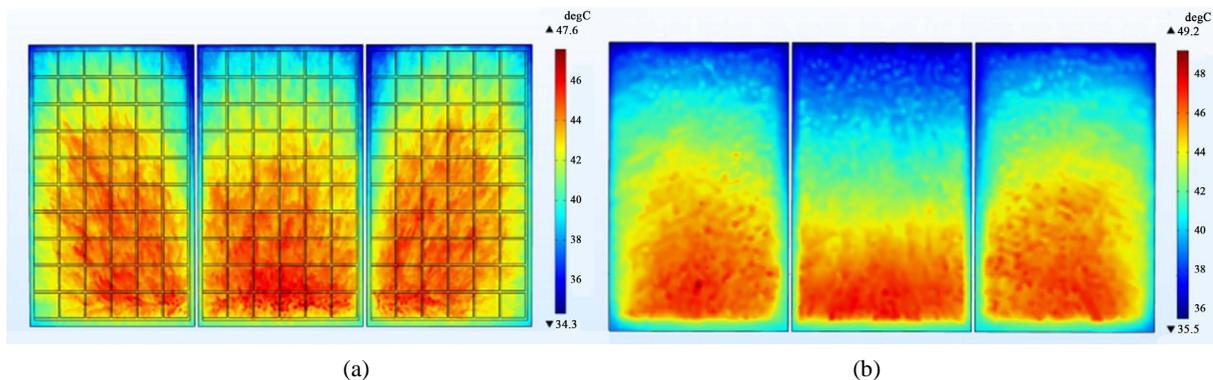


Figure 7. (a) Without water cooling system; (b) With water cooling system  
图 7. (a) 未引入水冷系统; (b) 引入水冷系统

分别测量光伏板的输出功率，测量数据如图 8 所示：

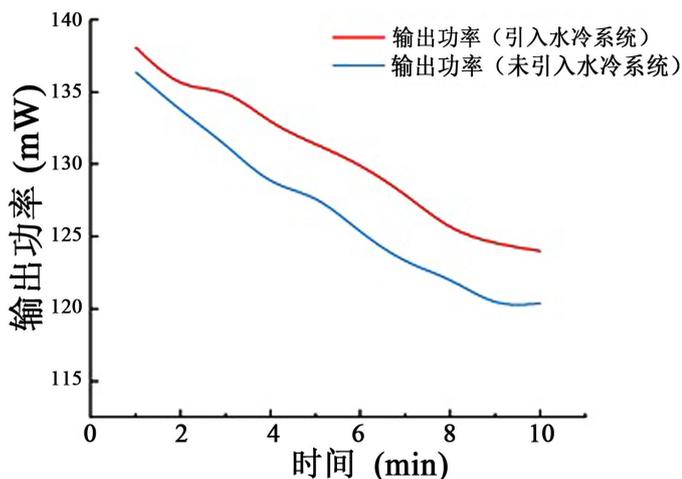


Figure 8. Output power of photovoltaic panels in different environment  
图 8. 不同环境下光伏板输出功率

由表格可知引入水冷系统后，光伏板的输出功率相比于未引入水冷系统高，本文以引入水冷系统后光伏板的输出功率与无引入水冷系统光伏板的输出功率比值的均值减 1 作为效率提高的值，即：

$$\mu_1 = \left( \sum_{i=1}^{10} w_2/w_1 - 1 \right) / 10 \quad (8)$$

计算得到  $\mu_1 = 12.41\%$ ，由此可得引入水冷系统后光伏板的效率相比于未引入水冷系统高出  $\mu_1 = 12.41\%$ 。

### 3.3. 总体效益计算

普及该综合发电系统，白天，通过水冷装置散热，旋转光伏板进行追光。该系统与传统的空气散热相比使太阳能电池板发电效率提高了 16.64%。旋转光伏板进行追光，其发电效率提升率为 12.41%。因此两者共同作用发电效率可提高 29.05%。

通过查阅《徐州市年鉴》，得到徐州市月气象情况如表 1 所示(以 2022 年为例)。

**Table 1.** Meteorological situation of Xuzhou City in 2022**表 1.** 2022 年徐州市气象情况

月份	平均气温(°C)	日照小时数
全年	16.64	2231.0
1	2.3	88.8
2	3.6	157.8
3	11.7	173.7
4	17.9	211.3
5	22.1	279.2
6	29.3	275.9
7	28.3	148.2
8	29.2	201.9
9	23.1	207.8
10	15.8	191.3
11	11.9	115.1
12	1.2	179.8

由计算公式结合徐州市日照时长可知全市太阳能光伏板若引入本设计后,年多发电量为 179.9336 万度电,加上水热等效能量可对标 913.567 吨标准煤。

### 3.4. 成本计算

光伏发电的度电成本是指光伏项目单位电量所发生的综合成本。本文采用动态成本法对徐州市光伏系统发电成本进行分析,度电成本计算如公式 9、公式 10 所示:

$$C = [I \times CFR + M] / Q \quad (9)$$

$$CFR = i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1] \quad (10)$$

其中,  $C$  表示度电成本(元/kwh),  $I$  表示项目初始投资(元),  $n$  表示项目 25 年寿命期(年),  $i$  表示折现率,取 8%,  $CFR$  表示等额资金回收系数,  $Q$  表示年均发电量(kwh),  $M$  表示年运维费用(元)。

由上文可得徐州市的最终投资结果为 1863600 CNY, 度电成本为 0.5163 CNY/kwh。

## 4. 创新点及应用

### 4.1. 创新点

(1) 增加北斗定位模块,实时计算出太阳的高度角和方位角利用双轴二维云台实现太阳追踪,确保太阳光线始终垂直照射在光伏板上,最大化提升光伏板接收太阳能的效率,避免了压差式追光由天气造成的阴影遮挡或光照角度不佳等因素导致的能源损失。

(2) 利用封闭循环水路降温技术,可以减少光伏板因过热而导致的功率损失,并节约水资源,提高光伏板系统的整体性能,进而提高光伏板的发电效率、延长使用寿命。

(3) 利用相变材料石蜡储存被带走的热量,用于热水供应,实现能源的再利用。不仅提高了系统的能源利用率,还实现了能源的多功能利用。

### 4.2. 应用

(1) 住宅应用:越来越多的家庭选择在屋顶安装太阳能光伏系统,智能调控系统可以帮助家庭实现自给自足,减少能源消耗,降低能源账单。

(2) 商业和工业用途: 许多商业和工业建筑已经安装了太阳能光伏系统, 智能调控系统可以帮助实时监测系统运行状态, 提高建筑的发电效率, 实现建筑节能减排和可再生能源利用。

(3) 离网地区和岛屿: 在一些离网地区和岛屿, 太阳能光伏系统结合智能调控系统可以提供稳定的清洁能源供应, 满足当地居民和企业的能源需求。

## 5. 结论及展望

该设计利用北斗定位系统结合单片机实现高精度、高可靠性的追光方案, 并提出一种封闭循环水路降温的方式对光伏板工作温度进行智能调节。经过实验验证, 该设计对光伏发电效率的提升、水资源的节约具有良好的效果。经过实验及理论计算, 该设计对光伏板发电效率可综合提升 29.05%。以 2022 年徐州市地区为例, 参考《徐州市年鉴》相关气象情况及光伏产业发展信息, 若引用该设计, 一年可多发 179.9336 万度电, 等价于 913.567 吨标准煤。此外, 相变材料石蜡存储循环降温系统中的热量, 若进行再利用, 可减少 1793770 吨碳排放。

该设计在使用前需对光伏板的旋转角度进行初始化及误差修正, 否则将无法进行精准的追光, 在后续研究中, 团队设计者考虑使用陀螺仪实现光伏板初始旋转角度及运行角度的自我感知, 并与标准角度进行比较, 实现装置自我修正, 提高装置的自动化水平。

综上所述, 本文的研究在提高光伏发电效率、节约能源方面具有重要意义, 同时在环境保护和可持续发展方面体现了显著的价值, 具有良好的应用前景。随着科技的发展和进一步的优化将使该系统更加智能化、高效化, 为光伏产业未来的发展提供了重要的参考。

## 注 释

文章所有图片均为作者自绘或者自摄。

## 参考文献

- [1] 太阳能发展“十三五”规划[J]. 太阳能, 2016(12): 5-14+24.
- [2] 韩聪, 郭冠生, 郭寅远, 等. 集中式光伏电站发电效率提升研究综述[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(17): 161-164.
- [3] 戴志军, 徐余法, 苏强强, 等. 基于北斗授时定位的太阳能追光系统[J]. 上海电机学院学报, 2014, 17(3): 144-150.
- [4] 卢国杰. 基于 GPS 的太阳跟踪控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [5] 张婷婷. 太阳跟踪控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2016.
- [6] 朱宏志. 太阳能相变蓄热驱动吸收式热泵系统的模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2022.