

# 光伏结构风载特性分析与最大功率跟踪优化研究

许江涛, 朱凌轶\*, 朱旭杰, 乔一轩, 周静妍

南京工程学院机械工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年9月8日; 录用日期: 2023年10月3日; 发布日期: 2023年10月9日

## 摘要

加大太阳能的开发利用, 减少能源领域碳排放, 是实现“碳中和”的有效路径。然而太阳能面临着太阳能利用率低, 受极端天气破坏等现实问题。因此为了提高太阳能的利用率, 基于双轴追日原理, 提出了兼顾抗风能力的光伏发电智能追日系统。本文结合流固耦合理论, 对其关键部位进行受力分析, 构建了兼顾发电量和抗风破坏的优化模型, 通过调节电池板的姿态参数, 达成卸载风载和发电量最大化间的折衷, 减少风力等对电池板的破坏, 有效延长机构的寿命。结果表明对比, 相关方案通过开发视日姿态调整装置, 面初始倾角为 $45^\circ$ 放置时较为合理, 且跟踪变化的最佳倾角基本集中于初始位置放置时的 $[0^\circ, 20^\circ]$ 之间, 所设计的智能追日系统达到发电量最大功率的目的, 本研究结论为光伏结构的小型化、自动化发展提供了思路, 为光伏功率最大化提供了理论依据。

## 关键词

光伏发电, 电器控制, 对日跟踪, 仿真分析

# Research on Wind Load Characteristics of Photovoltaic Structures and Optimization of Maximum Power Tracking

Jiangtao Xu, Lingyi Zhu\*, Xujie Zhu, Yixuan Qiao, Jingyan Zhou

School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu

Received: Sep. 8<sup>th</sup>, 2023; accepted: Oct. 3<sup>rd</sup>, 2023; published: Oct. 9<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 许江涛, 朱凌轶, 朱旭杰, 乔一轩, 周静妍. 光伏结构风载特性分析与最大功率跟踪优化研究[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(5): 443-455. DOI: 10.12677/met.2023.125049

## Abstract

To increase the development and utilization of solar energy and reduce carbon emissions, the energy sector is the effective path to realize “carbon neutral”. However, solar energy faces practical problems such as low solar energy utilization rate and extreme weather damage. Therefore, to improve the utilization rate of solar energy, based on the principle of dual-axis sun tracking, an intelligent sun tracking system for photovoltaic power generation with wind resistance is proposed. In this paper, based on the fluid-structure coupling theory, the stress analysis of the key parts was carried out, and an optimization model was constructed that took into account both energy generation and wind damage resistance. By adjusting the attitude parameters of the panels, a compromise was reached between the unloading of wind load and the maximization of energy generation, which reduced the damage of wind on the panels and effectively extended the life of the mechanism. Results show that contrast, relevant solutions by developing view, attitude adjustment device, the surface of the initial Angle of 45° placed reasonably, and the best inclination angle for tracking changes is concentrated between 0° and 20° when the initial position is placed. The designed intelligent sun-tracking system achieves the purpose of maximum power generation, this research conclusion for the miniaturization, and automation development of photovoltaic structure provides a train of thought and a theoretical basis for photovoltaic power maximization.

## Keywords

Photovoltaic Power Generation, Electrical Control, Sun Tracking, Simulation Analysis

Copyright © 2023 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

在碳中和的愿景下，未来的能源发展目标将以“新能源”和“智能能源”体系为主，具有智能化、清洁化和高效化的能源体系特点。为此，许多国家已将太阳能等可再生能源作为 2030 年以后能源供应安全的重点[1]。为此我国也在《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021-2035 年)》(以下简称《双重规划》)中，将新能源作为七大战略性新兴产业之一，未来将重点发展核电、风电、太阳能和生物质能四大产业[2]。

而太阳能作为一种清洁无污染的能源，有着巨大的开发前景。我国的太阳能资源非常丰富，每年接收到的太阳辐射能约为  $50 \times 10^{15}$  MJ。其中青藏高原地区的太阳辐射总量最大，因而，发展太阳能对于我国西部地区的经济和社会发展具有重要的现实意义[3] [4]。

早在 1979 年美国就研制出一种单轴线的引力型太阳能追踪器。这种追踪装置结构简便，成本较低，但是其追踪距离较短，追踪准确率较低。随后，捷克、美国等相关人员各自研发出太阳能追踪仪装置[5] [6]，受限于结构尺寸、精度等因素，效率提升有限。

2015 年，Fevzi Kentli 等人[7]设计了一种新型的光敏电阻式太阳能双轴自动追逐装置，利用该装置在不同的光照条件下，通过对其进行调整，使其在阳光照射下的位置与其相匹配，使其光伏转化效率提升 30%。

随后,太阳能跟踪技术的发展也促进了各种形式的跟踪设备的产生,Fábio Moacir Hoffmann 使用 LDR 来确定太阳的方位,并调整引擎的两个轴心的追踪者,从而实现了每个月的太阳能收入的增长,分别达到了 20%和 31.1% [8]。另外,日本,瑞士,法国等国家也在对太阳辐射进行观察时,使用了自动化的太阳追踪设备。

我国对日面追踪的研究起步较晚,2008 年推出的压差型追踪系统,因其结构简单,操作简便,可根据日晒条件下的不同部位的电压变化,可实现对日晒的实时追踪,但因其无法全天追踪日晒,每日需人工调节一次,无法满足规模化生产的要求[9]。在同一年,南航和上交也研制出了以 PSD 为基础的高精密太阳能追踪仪,均以强度探测为基础的[10] [11]。

重庆大学于 2012 年成功研制出一种由反射镜、支撑结构、轨迹驱动系统等构成的槽型太阳能集热器系统,可为公司的产品设计、优化及技术改造等方面应用[12],也可为该公司的具体生产实践提供借鉴与指导,并对公司的生产实践中遇到的问题提供有效的技术支持。

基于上述理论,近几年也有许多不同类型的跟踪装置问世。2019 年,封居强团队[13]根据四象限原理,提出了一套两轴线精密追踪系统,其光电转换效率较静止型太阳电池提升 32.4%,解决了传统追踪型太阳电池效率较静止型太阳电池效率降低 32.4%的难题。朱永强等[14]于 2021 年根据其几何联系,导出了一种新的单轴线追踪模式,并将其与常规单轴线追踪模式进行了对比,并对其进行了数值模拟和计算。横向单轴线追踪模式比纵向单轴线追踪模式有 22.7%的改善,全年辐射总量比纵向单轴线追踪模式有 97%~99%的改善。王青峰[15]于 2022 年将视日行迹追踪与光电追踪相结合,以光线聚集装置为核心,采用单片机及其它微处理器,研制出一种集日行迹追踪与光电追踪于一体的集日行迹追踪装置。

本文基于双轴视日的基础上,针对太阳能装备受恶劣天气破坏严重的问题,开展了设计研究,基于流固耦合分析构建兼顾发电功率和装置使用寿命的优化模型,为小型光伏装备的开发设计提供新的思路,具有良好的市场前景与应用价值。

## 2. 方案选择与理论分析

由于,太阳能板的倾角会影响太阳的入射角,导致其接收到的太阳辐射量不同,如公式(1)所示:

$$R_{\beta} = S \times \left[ \frac{\sin(\alpha_s + \beta)}{\sin \alpha_s} \right] + D \quad (1)$$

其中,  $R_{\beta}$  为倾斜光伏阵列面上太阳能总辐射量,  $S$  为水平面上太阳直射辐射量,  $D$  为散射辐射量,  $\alpha_s$  为太阳高度角,  $\beta$  为太阳能板倾角。

发电量如公式(2)所示:

$$G = \frac{E_q}{3600} \times \eta \times 10^3 \quad (2)$$

其中,  $G$  为单位面积太阳能电池板发电量( $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ),  $E_q$  为月平均辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ),  $\eta$  为发电效率。

因此,为了提高太阳能的发电效率,一些学者对太阳能自动跟踪系统做出了一系列的研究并提出相应的设计方案。

### 2.1. 跟踪方案选择

目前,太阳能自动跟踪系统按照控制系统跟踪方式的不同可以分为:视日轨迹跟踪系统、光电跟踪系统和基于数字图像处理的跟踪系统[16]。本文采用视日跟踪和光电跟踪的混合跟踪方法,在一级采用视

日跟踪方法的同时为避免视日运动轨迹跟踪的误差累计问题,采用二级光电池传感器进行跟踪进行校正。提高了太阳能的追踪精度的同时又避免了死区和天气对追踪造成的影响。

## 2.2. 视日最大功率追踪

由于太阳直射点在南北回归线之间运动,为更好的视日追踪,增大入射角提高接受辐射量,故假设以观察者为中心,半径为无限长的球体为天球,通过高度角 $\alpha_s$ 与方位角 $\gamma_s$ 来实现太阳位置的确定[17][18][19][20]。

由于赤纬角 $\delta$ 是确定太阳高度角 $\alpha_s$ 与方位角 $\gamma_s$ 重要参数,且多位学者中 Spencer 算法误差小、精度高、过程相对简单[20],因此本文选用 Spencer 算法作为计算太阳赤纬角的近似算法如公式(3)所示:

$$\delta = \frac{180}{\pi} [C_1 \sin \theta + C_2 \sin(2\theta) + C_3 \sin(3\theta) - C_4 \cos \theta - C_5 \cos(2\theta) - C_6 \cos(3\theta) - C_7] \quad (3)$$

其中,  $C_1 = 0.070257$ ,  $C_2 = 0.000907$ ,  $C_3 = 0.00148$ ,  $C_4 = 0.399912$ ,  $C_5 = 0.006758$ ,  $C_6 = 0.002697$ ,  $C_7 = 0.006981$ ,  $\theta$  为日角如公式(4)所示:

$$\theta = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (4)$$

其中,  $n$  为积日。

太阳高度角 $\alpha_s$ 指太阳光的入射方向和地平面之间的夹角,它与太阳赤纬角 $\delta$ 、时角 $\omega$ 的关系式如公式(5)所示[21]:

$$\sin \alpha_s = \sin \vartheta \sin \delta + \cos \vartheta \cos \delta \cos \omega \quad (5)$$

其中,  $\alpha_s$  为太阳高度角,  $\omega$  为太阳时角,  $\vartheta$  为当地纬度,  $\delta$  为太阳赤纬角。

太阳方位角 $\gamma_s$ 是指太阳光线在水平面上的投影和当地子午线的夹角关系式如公式(6)所示[22]:

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha_s} \quad (6)$$

其中,  $\alpha_s$ 、 $\omega$ 、 $\delta$  的含义与公式(5)中相同,  $\gamma_s$  为太阳方位角。

太阳时角计算如公式(7)所示:

$$\omega = 15 \times (ST - 12) \times \frac{\pi}{180} \quad (7)$$

其中,  $\omega$  的含义与公式(5)中相同,  $ST$  为真太阳时与该地时间、经度、时差相关[23][24]。

## 2.3. 风产生的应力

同时太阳能板还受到其他外界因素影响如温度、太阳能板板面的灰尘、风力等,而本文主要研究风力对太阳能板与太阳能板支撑结构造成的干扰,根据空气阻力的计算如公式(8)所示:

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S_1 \quad (8)$$

其中,  $C_D$  为空气阻力系数,  $\rho$  为空气密度(取  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ),  $V$  为物体与空气的相对运动速度,  $S_1$  物体迎风面积。

迎风面积  $S_1$  如公式(9)所示:

$$S_1 = S_2 \sin \alpha_s \cos(\gamma_s - \beta_1) \times \frac{\pi}{180} \quad (9)$$

其中,  $S_2$  是太阳能板实际大小,  $\alpha_s$  与公式(5)中相同,  $\gamma_s$  与公式(6)中相同,  $\beta_1$  是风向角。

取雷诺数  $R_e = 6.4 \times 10^4$ , 由于  $0 < R_e < 2 \times 10^5$  故空气阻力系数  $C_D$  如公式(10)所示:

$$C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{6}{1 + \sqrt{R_e}} + 0.4 \quad (10)$$

因此, 风产生的应力的的大小受视日追踪时的角度变化而影响, 当视日追踪遇到恶劣天气会对机构造成严重破坏, 导致机构疲劳失效。

### 3. 控制方案与程序

机械部分采用双轴跟踪方法, 为实现对太阳光的高度角和入射角的调节, 如图 1 所示。

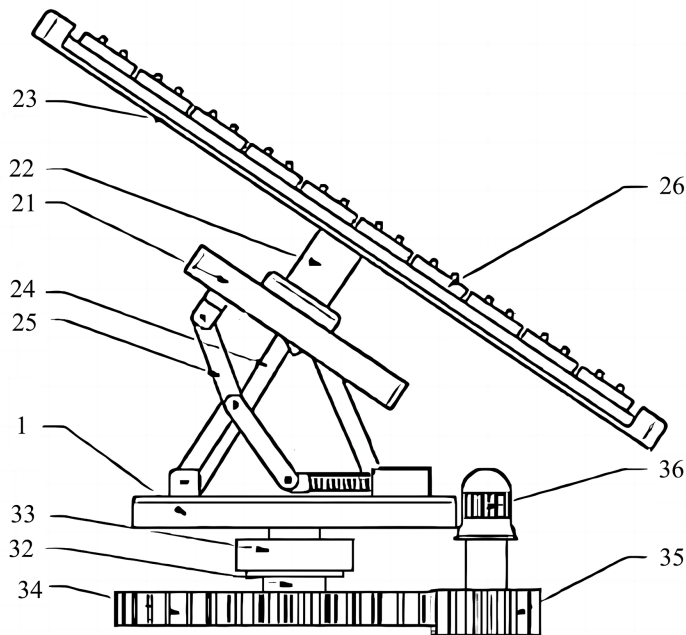


Figure 1. Horizontal rotating mechanical mechanism

图 1. 水平转动机械机构

水平转动机械机构通过一对齿轮啮合的方式传动, 使太阳能板能在水平方向  $360^\circ$  的旋转。同时为实现高效传动时避免和减小因加工和装配带来的同轴度误差, 电机通过弹性联轴器与转轴连接, 而且转轴的轴向采用推力球轴承固定和辅助转动, 以达到减小整体机构的摩擦的目的。如图 2 所示, 垂直转动机械结构通过电机伸缩杆推拉一组四杆机构传动, 使太阳能板能在垂直方向  $90^\circ$  的旋转, 同样为较少摩擦转轴部分采用与水平结构相似的方法利用轴承固定和辅助转动。同时电机的转动通过程序控制, 防止转角超限损坏机械结构。

控制部分系统原理如图 2 所示, 利用 PLC 控制, 在太阳能板两侧同一水平线上放置两个光敏传感器, 以减小视日轨迹跟踪时计算的误差, 可根据各地情况手动设定传感器二者差值的阈值, 当在阈值范围内时, 程序根据视日轨迹自动跟踪。当超出阈值时, 程序通过传感器修正太阳能板姿态使之回到阈值范围内, 之后继续根据视日轨迹跟踪。

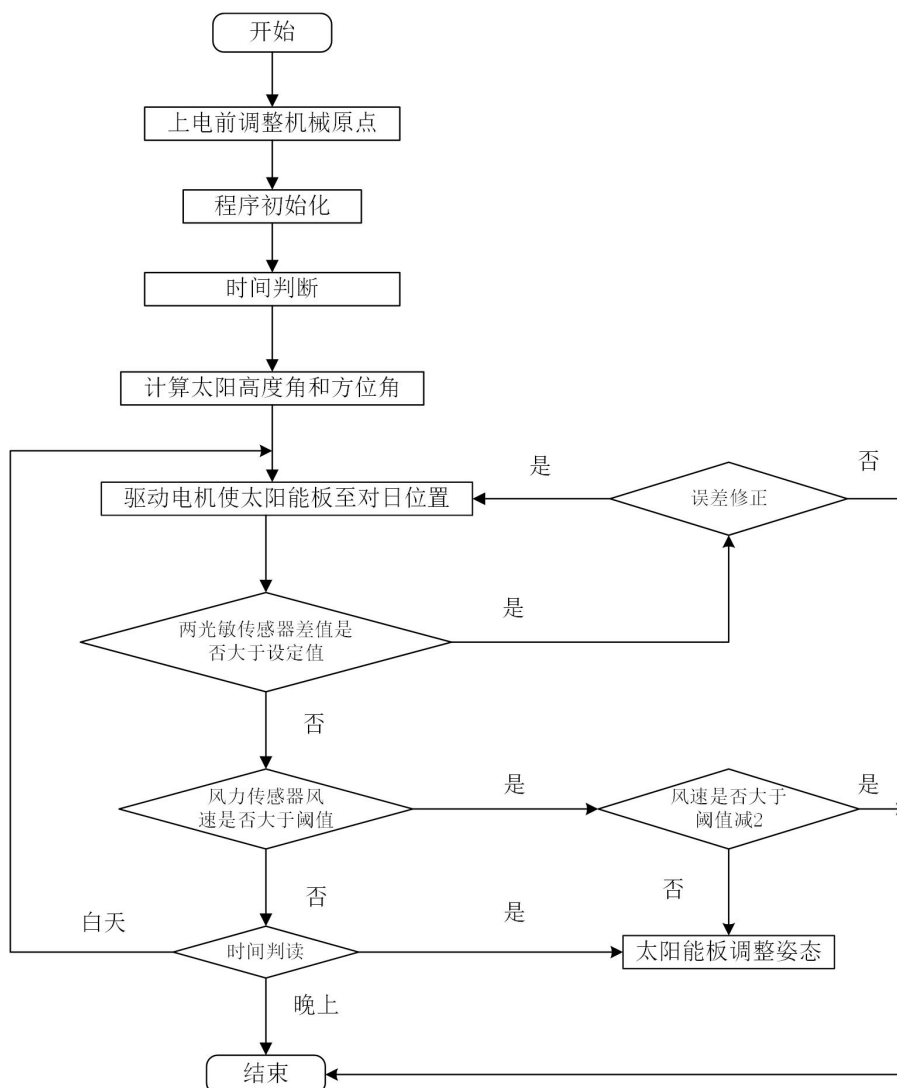


Figure 2. Track control system program flow chart  
图 2. 跟踪控制系统程序流程图

PLC 控制电机以调整太阳能板各角度，在保持高效追光发电的同时以减小风对系统的损坏。当风速超出阈值时，PLC 再次控制电机调整太阳能板各角度，兼顾视日轨迹跟踪和自我保护机构，待风速重回阈值内再开始视日轨迹跟踪。同时在 PLC 中添加一些辅助传感器用于采集追踪系统的状态信息如：安装位置(经纬度)、当前时间(月、日、时、分、秒)、温度等。

#### 4. 流场建模、仿真分析与优化

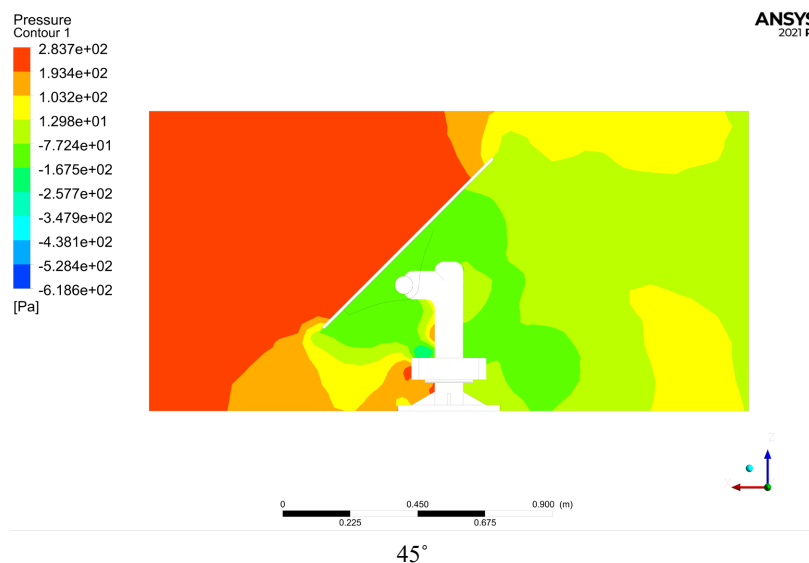
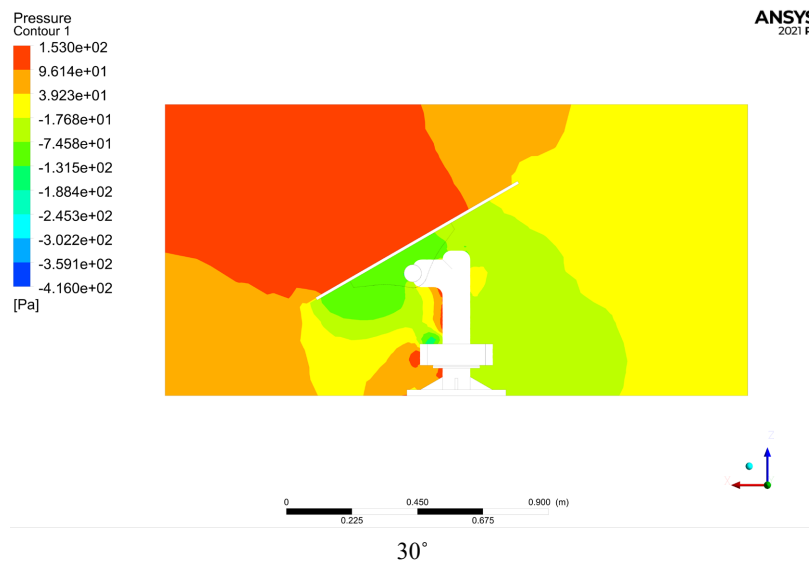
太阳能电池板工作过程中受到风载作用，计算流体域进行建模时，计算域的尺寸选择为：2 m × 1 m × 1 m；边界条件设置为：根据风速风向统计结果取平均风速 10 m/s 对应风速风级表约为 5 级，根据与计算域入口实验廓线相似的开阔地形的大气湍流模型，设置湍流强度 20%，底部应用防滑粗糙墙，面板表面、支撑结构以及域的侧面和顶部应用防滑光滑墙，出口区域应用零压力梯度[25]；为更有效的调查风效应对地面安装的太阳能电池板倾斜角度的影响，选取面板倾斜角度为 30°、45°和 60°三种方案进行仿真分析。

#### 4.1. 压力场分析

如图 3, 当倾角为  $30^\circ$  放置时板前板面最大压力为 153 Pa, 倾角为  $45^\circ$  放置时板前板面最大压力 283.6 Pa。倾角为  $60^\circ$  放置时板前板面的压力最大为 455 Pa, 较倾角为  $30^\circ$  放置时压力增长约 297%, 较倾角为  $45^\circ$  放置时压力增长约 160%, 因此不难看出当风向风速相同时倾角越大板前板面的压力也越大, 底座的冲击越强。

从压力数值上看三种放置方法均在流场中产生了负压力系数, 这是由于风流撞击太阳能电池板前缘而后分离, 由于支撑柱的存在, 风在电池板背风侧形成两个漩涡, 向上分离的气流到达后缘后, 在太阳能板下表面形成一个逆时针旋转的大回流区。因此导致面板迎风面出现正压力系数, 背风面出现负压系数, 尤其是在倾角为  $30^\circ$  和  $45^\circ$  放置时这一现象表现的十分明显。

从截面的压力面积上看, 倾角为  $45^\circ$  放置时倾角的太阳能板板面高压面积最大约为倾角  $30^\circ$  放置时的 1.5 倍, 而倾角为  $60^\circ$  放置时的大约为倾角  $30^\circ$  放置时的 2 倍。为进一步说明度负压力产生原因与倾角为  $30^\circ$  放置时产生较大正压力这一现象, 接下来通过对速度的深入分析, 提供进一步的解释。



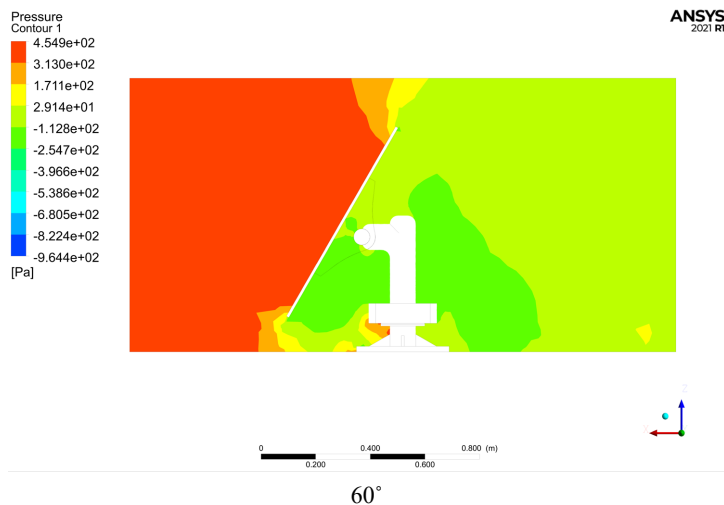
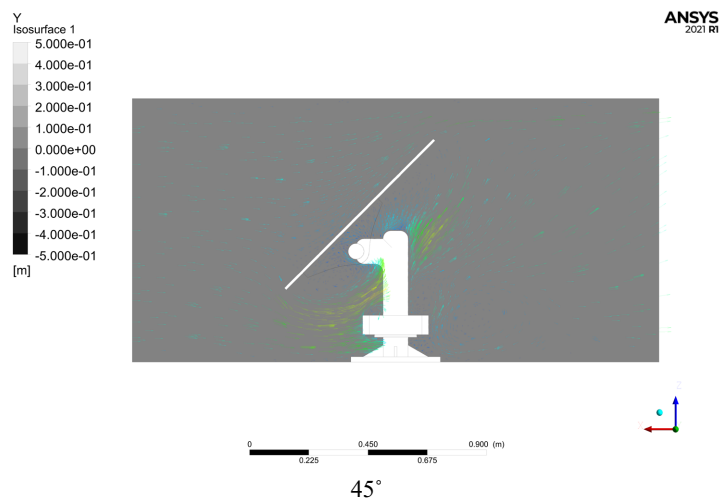
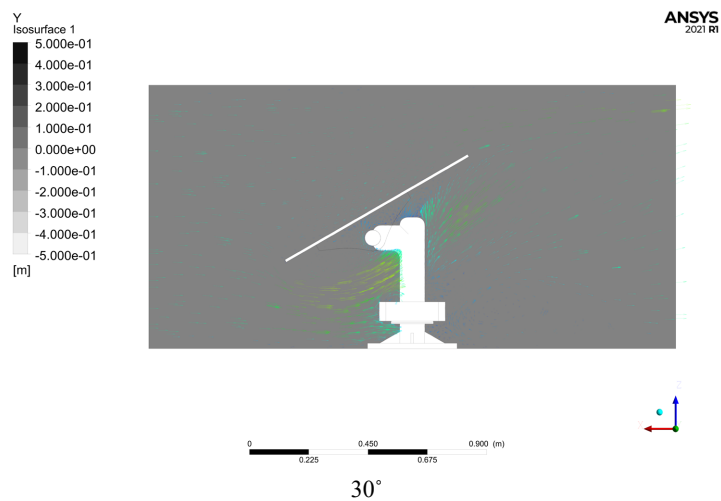
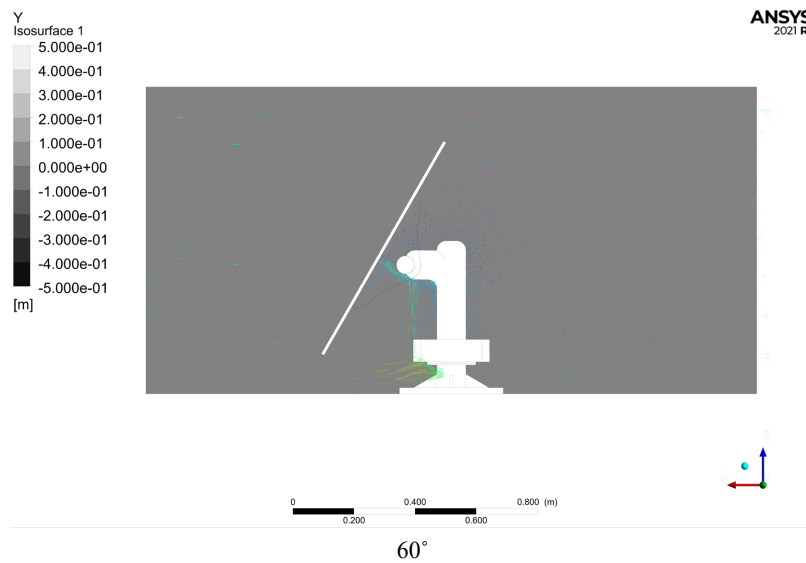


Figure 3. 30°, 45°, 60° solar panel surface air pressure  
图 3. 30°、45°、60°放置时太阳能板面空气压力

## 4.2. 速度场分析



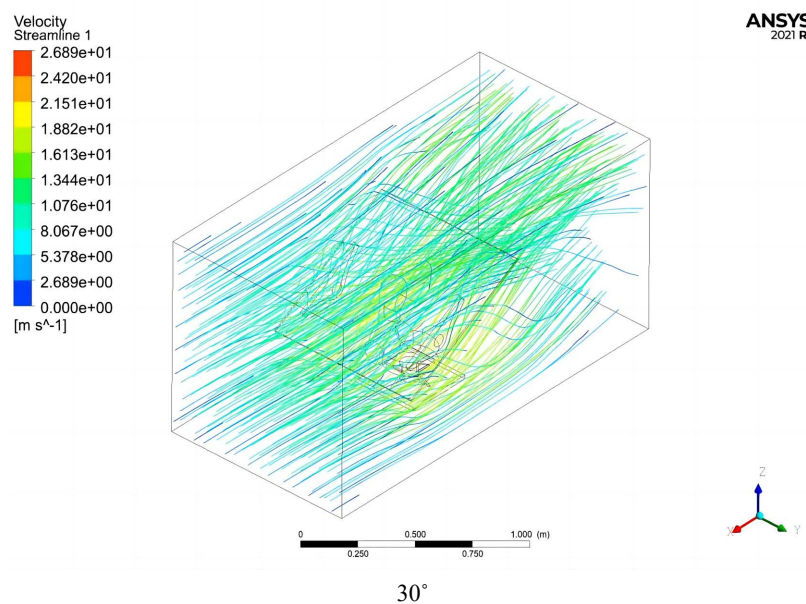


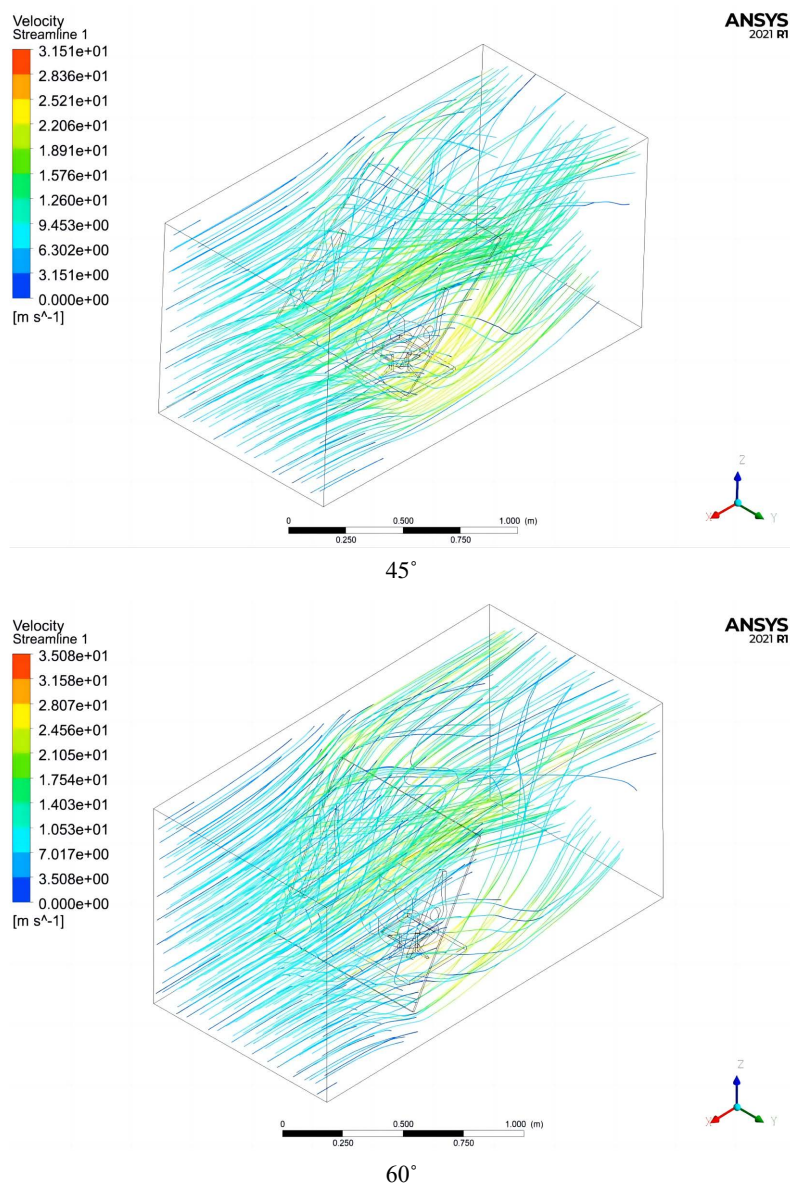


**Figure 4.** Air velocity vector diagram of solar panel surface at 30°, 45° and 60°  
**图 4.** 30°、45°、60°放置时太阳能板面空气流速速度矢量图

为进一步说明压力分析时不同倾角产生的压力产生的大小与负压力的产生的原因下面对太阳能板进行速度分析，在初始风速和风向都相同的条件下对比截面上的速度矢量图如图 4 所示，可明显看出倾角为 30°放置时太阳能板板前的最大速度 20.17 m/s，倾角为 45°放置时太阳能板板前的最大速度 23.63 m/s，较倾角为 30°放置时速度增长约 117%，倾角为 60°放置时的太阳能板板前的风速最大达到 26.31 m/s，较倾角为 30°放置时速度增长约 130%，较倾角为 45°放置时速度增长约 111%，这与压力分析时的表现的规律一致。

而如图 5 的流线图所示，倾角为 60°放置时的太阳能板板后几乎阻滞了风场流过，倾角为 30°放置和倾角为 45°放置时太阳能板板后均有风场，且倾角为 30°放置比倾角为 45°放置时太阳能板板后风场流线密，这与压力分析时观察到的规律一致。



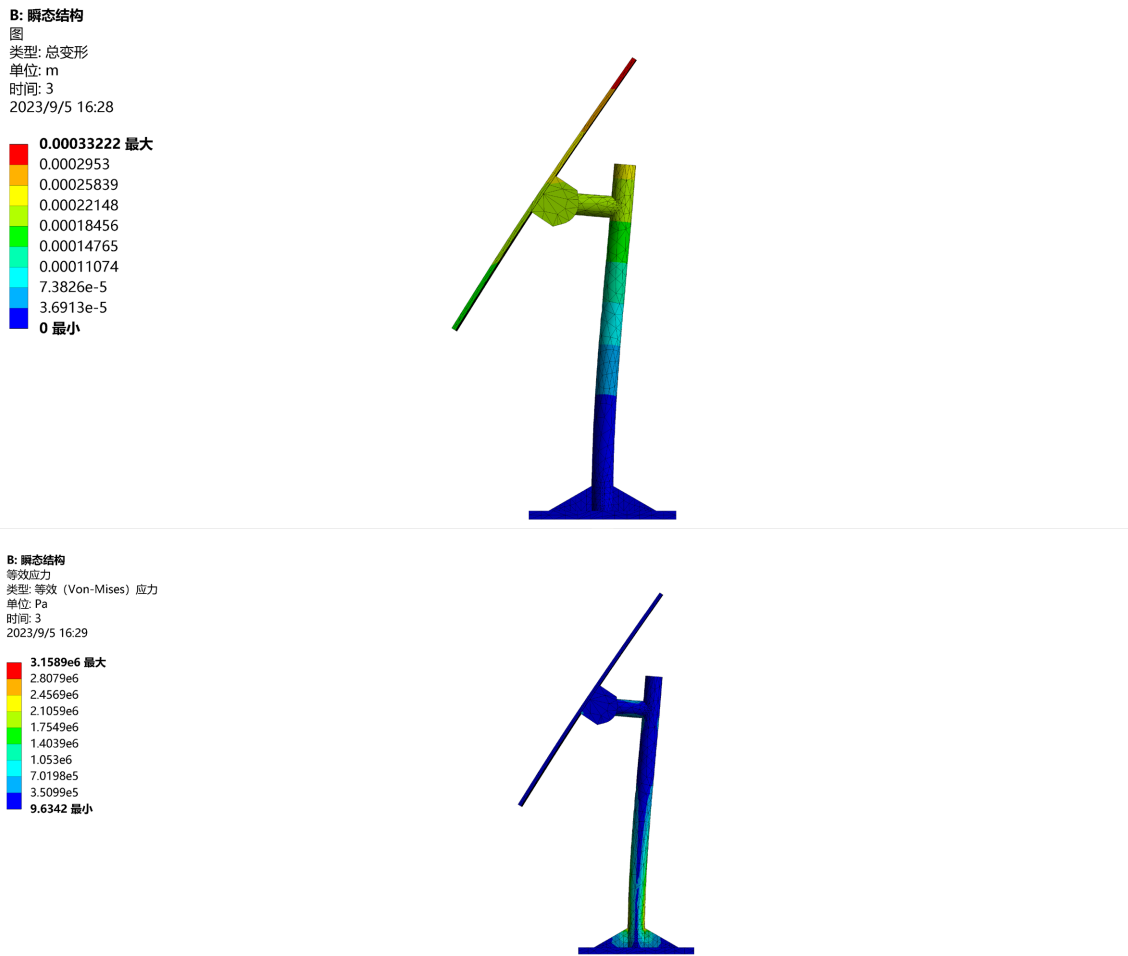


**Figure 5.** Air velocity flow diagram of solar panel at 30°, 45° and 60°  
**图 5.** 30°、45°、60°放置时太阳能板面空气流速流线图

### 4.3. 优化设计

由于倾角为 60°放置时板前压力最大，为保持变量取风速 10 m/s，板后支撑材料为铝合金，为满足强度要求同时减少成本，查表选择 6061 铝合金抗拉强度 205 Mpa，屈服强度 55.2 Mpa，弹性系数 68.9 Gpa，取屈服强度 55.2 Mpa 进行后续仿真优化，仿真结果如图 6 所示。

由风速 10 m/s 对应风速风级表约为 5 级，故倾角为 60°放置时流固耦合仿真在风速 5 级的情况下，太阳能板形变最大为 0.545 mm，后杆支撑整体形变与应力分别为 0.148 mm 与 5.35 MPa，俯仰调节杆由于受太阳能板阻挡影响整体形变与应力较小分别为 0.221 mm 与 1.78 MPa，因此无论是形变量还是应力均较小，远小于屈服强度 55.2 MPa，但图中仍可看到明显的变形。因此，对于风级的极限值，即 10 级，需要进行进一步的优化设计。



**Figure 6.** The result of fluid-structure coupling when the dip Angle is 60°  
**图 6.** 倾角 60°放置时流固耦合结果

因此，通过上述 2.1、2.2 公式关系利用 MATLAB 得倾角与应力关系，进行优化仿真，取一年中春分、夏至、秋分、冬至作为时间样本，西安(东经 107.40°~109.49°和北纬 33.42°~34.45°故取东经 108°北纬 34°)作为西部地区地理位置样本，根据风速风向统计结果,西安地区风向以 E 风向(33.719%)和 WSW 风向(14.459%)为主，取太阳能板面为  $S_{原} = 1.25 \text{ m}^2$ 。

**Table 1.** Changes in the optimal solar altitude angle during tracking at different seasons

**表 1.** 不同时节跟踪时太阳最优高度角变化

时间/h	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
春分跟踪高度角变化/°	-9.03	-2.57	2.37	5.50	6.59	5.57	2.51	-2.37	-8.79	-16.42	-24.97
夏至跟踪高度角变化/°	-42.29	-53.87	-65.64	-77.35	-85.92	-77.09	-65.38	-53.61	-42.03	-30.79	-20.05
秋分跟踪高度角变化/°	4.06	12.47	19.06	23.26	24.62	22.96	18.49	11.70	3.13	-6.72	-17.49
冬至跟踪高度角变化/°	44.32	53.47	62.09	69.02	71.84	68.75	61.69	53.03	43.87	34.76	26.00

**Table 2.** The stress generated by different wind directions under the change of optimal altitude angle change  
**表 2.** 在最优高度角变化下不同风向风级产生的应力大小

时间/h	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
春分 E 风向十级风应力大小/Mpa	25.61	7.32	6.75	15.64	18.74	15.84	7.14	6.76	24.93	46.12	68.88
春分 WSW 风向十级风应力大小/Mpa	16.67	4.77	4.39	10.18	12.20	10.31	4.65	4.40	16.23	30.02	44.84
夏至 E 风向十级风应力大小/Mpa	102.88	123.50	139.30	149.20	152.52	149.04	139.00	123.08	102.37	78.27	52.43
夏至 WSW 风向十级风应力大小/Mpa	24.22	29.07	32.79	35.12	35.90	35.08	32.72	28.97	24.10	18.42	12.34
秋分 E 风向十级风应力大小/Mpa	11.46	34.93	52.82	63.89	67.40	63.11	51.31	32.80	8.84	18.92	48.61
秋分 WSW 风向十级风应力大小/Mpa	8.05	24.52	37.08	44.85	47.31	44.30	36.01	23.02	6.21	13.28	34.12
冬至 E 风向十级风应力大小/Mpa	109.40	119.38	127.03	131.83	133.45	131.79	126.95	119.27	109.26	97.62	85.14
冬至 WSW 风向十级风应力大小/Mpa	71.39	77.91	82.90	86.03	87.09	86.00	82.84	77.83	71.30	63.71	55.56

根据表 2 的数据, E 风向应力明显高于 WSW 风向, 故先校核 E 风向, 满足屈服强度 55.2 Mpa, 再校核 WSW 风向, 据表 1 得出的各时节最佳倾角变化范围。春分 E 风向十级风 17~18 时不满足, WSW 风向全时段满足, 故综合最佳倾角变化为 $[-16.42^\circ, 6.59^\circ]$ 。夏至 E 风向十级风几乎全时段均不能满足故机构中断自保护, 但 WSW 风向时全时段满足, 故综合最佳倾角变化为 $[-30.79^\circ, -20.05^\circ]$ 。秋分 E 风向十级风 11~13 时不满足, 但 WSW 风向全时段满足, 故综合最佳倾角变化为 $[-17.49^\circ, 19.06^\circ]$ 。冬至十级风无论 E 风向还是 WSW 风向均不能满足, 故机构中断自保护。

综上所述, 取平均风力 5 级风的条件下进行了流固耦合仿真。结果显示, 应力满足设计要求, 但图中形变明显。因此, 在后续 Matlab 研究分析在, 在保证发电的情况下, 结果表明通过调整太阳能板的角度可以使最大应力下降 46.05%, 且随着风力增大, 角度调整下降幅度更为显著, 同时不同风向和风力对应的倾角也不同, 但在不考虑太阳能板板面旋向的情况下基本角度集中于初始位置放置时 $[0^\circ, 20^\circ]$ 之间变化。

## 5. 结论

本文提出一种基于 PLC 控制的太阳光追踪系统, 旨在提高太阳能跟踪系统的运行稳定性和追踪精度。该系统采用视日运动轨迹追踪方式作为主要跟踪方式, 光电追踪方式作为辅助误差调整方式, 实现了跟踪方法的分级控制, 以充分利用它们各自的优势。具体研究工作包括:

(1) 选择 PLC 作为核心处理器, 详细阐述了视日运动轨迹追踪方式的理论基础和太阳位置算法。最终确定采用视日运动轨迹追踪方式作为主要跟踪方式, 光电追踪方式作为辅助误差调整方式。

(2) 自主设计了太阳能双轴跟踪系统, 确定了各个结构的尺寸以实现设计目标。通过计算仿真, 得出了板面运动和周转运动的轨迹方程, 并在不同倾角下进行了板面压力和速度的理论计算和对照实验, 结果表明倾角为  $45^\circ$  时板面受压情况较好。

(3) 进行了流固耦合仿真实验, 以研究跟踪装置在风场下的应力、变形和对风场的交互作用影响。结

果显示, 在取风力为 5 级的条件下应力满足设计要求, 但仍存在明显形变。通过 Matlab 分析优化, 调整板面角度, 可以有效减少最大应力, 且风力越大效果越显著, 在不考虑太阳能板板面旋向的情况下, 倾角基本集中于初始位置放置时的 $[0^\circ, 20^\circ]$ 之间变化。

## 基金项目

国家自然科学基金面上项目(51775260), 江苏省大学生创新创业项目(202211276030Z)。

## 参考文献

- [1] 邹才能, 陈艳鹏, 熊波, 刘翰林. 碳中和目标下中国新能源使命[J/OL]. 中国科学院院刊, 2022, 37(11): 1560-1565. <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220830004>
- [2] 闫云飞, 张智恩, 张力, 代长林. 太阳能利用技术及其应用[J]. 太阳能学报, 2012, 33(S1): 47-56. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.2012.s1.001>
- [3] 王峥, 任毅. 我国太阳能资源的利用现状与产业发展[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 89-92. <https://doi.org/10.13776/j.cnki.resourcesindustries.2010.02.007>
- [4] 曹邵文, 周国庆, 蔡琦琳, 等. 太阳能电池综述: 材料、政策驱动机制及应用前景[J]. 复合材料学报, 2022, 39(5): 1847-1858. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220302.001>
- [5] 肖玉华. 基于 Atmega8 的双核太阳跟踪器设计[J]. 电子设计工程, 2010(3): 46-47
- [6] 李鹏. 双轴太阳跟踪系统运动规律的研究[J]. 机械制造, 2010(6): 25-26.
- [7] Kentli, F. and Yilmaz, M. (2015) Mathematical Modelling of Two-Axis Photovoltaic System with Improved Efficiency. *Renewable Energy*, **21**, 40-43. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.21.4.12780>
- [8] Hoffmann, F.M., et al. (2018) Monthly Profile Analysis Based on a Two-Axis Solar Tracker Proposal for Photovoltaic Panels. *Renewable Energy*, **115**, 750-759. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.079>
- [9] Omara, Z.M. and Eltawil, M.A. (2013) Hybrid of Solar Dish Concentrator. New Boiler and Simple Solar Collector for Brackish Water Desalination. *Desalination*, **326**, 45-48. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.07.019>
- [10] 王志超. 太阳能热发电系统中太阳跟踪器的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [11] 张翌翀. 基于 DSP 的太阳跟踪控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [12] 孔祥兵. 槽式太阳能聚光器支架结构的拓扑优化设计[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [13] 封居强, 杨伟虎, 韩芳. 基于四象限法则的高精度太阳跟踪系统设计[J]. 电源技术, 2019, 43(10): 1718-1721.
- [14] 朱永强, 刘家豪, 杨晓华, 郝嘉诚. 一种新型单轴太阳跟踪方式[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 347-352.
- [15] 王青峰. 创新型太阳能追光设备的研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(4): 87-91.
- [16] 陈舟. 太阳能双轴自动跟踪系统设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
- [17] 汤世松, 舒志兵. 双轴伺服太阳跟踪系统的设计[J]. 自动化仪表, 2011, 32(2): 49-51+55. <https://doi.org/10.16086/j.cnki.issn1000-0380.2011.02.005>
- [18] 董必文. 槽式太阳能光热发电跟踪控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2016.
- [19] Cooper, P.I. (1969) The Absorption of Radiation in Solar Stills. *Solar Energy*, **12**, 333-346. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4)
- [20] Spencer, J.W. (1971) Fourier Series Representation of the Position of the Sun. *Search*, **2**, 165-172.
- [21] Stine, W.B. and Harrigan, R.W. (1985) *Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications*. Wiley, Hoboken.
- [22] Bourges, B. (1985) Improvement in Solar Declination Computation. *Solar Energy*, **35**, 367-369. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90144-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90144-6)
- [23] 丁艳, 袁隆基, 赵培涛, 等. 太阳视日轨迹跟踪算法研究[J]. 节能, 2020, 458(11): 101-103.
- [24] 李万润, 张广隶, 李林, 杜永峰. 基于长期实测数据的西北地区风力发电场风速风向联合概率分布分析[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(3): 115-124.
- [25] Onur, Y. and Osman, M.A. (2021) An Experimental and Numerical Study of Wind Effects on a Ground-Mounted Solar Panel at Different Panel Tilt Angles and Wind Directions. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, **213**, Article ID: 104630. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104630>