doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202503006

# 准双轴光伏跟踪支架跟踪轨迹优化设计

马宇博,肖志权
(武汉纺织大学 机械工程与自动化学院,湖北 武汉 430023)

**摘要**:针对光伏发电系统中传统双轴跟踪系统成本高、运维复杂及固定支架效率低的问题,本文提出了一种基于天文算法与软件仿真的准双轴光伏跟踪支架轨迹优化方法。该方法通过天文算法计算太阳高度角与方位角,并结合PVsyst软件构建等效模型,在无需硬件改造的前提下通过软件驱动调整轨迹,实现轨迹优化,有效解决了传统双轴跟踪系统成本高、运维复杂的问题。仿真与实验结果表明,轨迹优化后的准双轴支架辐射量较轨迹优化前均有大幅提升,提升率分别为14.56%、8.29%。

**关键词**:准双轴;跟踪支架;辐射量仿真;轨迹优化
**中图分类号**:TM615 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5322(2025)03-0033-09

在太阳能光伏发电系统中,光伏板支架安装方式对系统的效率和成本有着重要影响。根据对太阳光跟踪方式的不同,光伏发电系统支架可分为固定倾角支架(固定支架)和跟踪支架。其中固定倾角支架以其低成本、简单的维护需求和稳定的结构受到青睐,但其发电效率受限于固定的倾斜角度,无法随季节变化或太阳位置而调整,导致能量收集效率较低[1];而跟踪支架系统,由于它包括钢结构、驱动及传动机构、控制器等,属于一个自成体系的机电控制系统,因此能量收集效率较高[2-4]。

跟踪支架系统主要有单轴跟踪支架和双轴跟踪支架。单轴跟踪支架通过动态调整组件的角度来减少阴影遮挡,从而提高了发电效率,并能适应不同的地理位置和环境条件;然而,这种方式需要更大的空间布局,以避免组件间互相遮挡,同时增加了驱动系统的维护需求,在某些纬度下表现不佳[5]。双轴跟踪则是最能提升发电效率的方式,它能够全天候追踪太阳位置,确保最大的光照接收量,几乎适用于任何地理位置[6];但是,这种安装方式的初期投资和长期维护成本较高,且由于复杂的机械设备和技术要求,增加了操作难度[7]。目前我国双轴跟踪支架市场渗透率仅为12%[8-9]。

旨在寻求光伏发电系统效率和成本之间的平衡,2022年罗马尼亚学者Alexandru[10]提出了一种单电机驱动双轴的太阳跟踪机构,其仿真分析表明这种伞齿轮-凸轮式的机构可以产生接近于双轴跟踪的效果,从而在跟踪效果和设备成本之间取得了一定的平衡,但该研究并未给出实物系统的验证结果;2022年Mahesh等[11]使用PVsyst对单轴和双轴跟踪器控制的太阳能光伏系统与固定倾斜太阳能光伏系统的性能进行了比较,并研究了模拟效果;2023年王映斐[12]提出了可变端点最优轨迹法,构造电能泛函以及光伏数学模型下的电压靶线函数,利用取极值的基本条件寻找出能达到最大功率的电压最优轨迹;2024年顾文兵等[13]分析了光伏阵列间距、光伏支架转动角度与光伏电站站址纬度、光伏支架倾角、太阳时角、太阳方位角等参数之间的关系,推导出单轴跟踪式光伏支架下光伏阵列间距的理论计算模型;2025年Liu等[14]对准双轴光伏跟踪系统的传动装

**收稿日期**:2025-07-04
**基金项目**:省部共建纺织新材料与先进加工技术国家重点实验室研究基金资助项目(FZ2020005);2024年武汉纺织大学研究生创新基金项目(523058)。
**作者简介**:马宇博(1998— ),男,山西运城人,硕士生,主要研究方向为智能制造。
**通信作者**:肖志权(1972— ),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向为智能制造。

置进行优化并做出实物进行实验。

本文对准双轴跟踪支架轨迹进行优化，并通过PVsyst仿真和实物验证，证实了可以在硬件装置不更改的情况下有效提高发电量。

## 1 准双轴光伏跟踪系统设计要素

本文研究的准双轴光伏跟踪系统基于天文算法驱动支架机构跟踪太阳位置，其优势在于不受天气干扰，但跟踪精度高度依赖天文算法的准确性与机构的机械性能。本章将阐述系统采用的天文算法及准双轴跟踪机构的运行原理。

### 1.1 天文算法

准双轴跟踪支架的时控跟踪控制策略依赖天文算法计算支架的方位角与高度角。该算法涵盖太阳赤纬角、时差以及跟踪支架所在地的方位角和高度角4个核心参数，计算公式如下：

1）太阳赤纬角

地球围绕太阳公转，太阳光线与地球赤道面之间的夹角呈现周期性变化，该夹角即为太阳赤纬角。Cooper[15]提出太阳赤纬角计算方程为

$$\delta = 23.45\sin\left(2\pi \times \frac{284 + n}{365}\right) \tag{1}$$

式中：$\delta$为太阳赤纬角；$n$为年积日，表示从每个闰年的开始日起，按每4年周期累计计算的天数。

2）时差

Meeus[16]提出时差表达式为

$$t_{eo} = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B \tag{2}$$

其中，$B = \dfrac{2\pi(n - 81)}{364}$

式中：$t_{eo}$表示真太阳时与平太阳时之间的差异，即太阳在天空中运行的实际时间与钟表时间的偏差。

3）太阳高度角

太阳高度角计算公式为

$$\sin\alpha = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos E_t \tag{3}$$

式中：$\alpha$为太阳高度角；$\varphi$为该地纬度；$E_t$为太阳时角。

4）太阳方位角

太阳方位角计算公式为

$$\sin\gamma = \cos\delta\sin E_t/\cos\alpha \tag{4}$$

式中：$\gamma$为太阳方位角。

### 1.2 准双轴跟踪原理

文献[10]提出一种单电机驱动的方位角型双轴跟踪系统，如图1所示。该系统核心结构包含两部分，分别是垂直轴与高度角轴。其中垂直轴负责日周期运动，使系统沿东西方向转动，实现太阳从东升到西落的跟踪；高度角轴负责水平轴调节光伏板倾斜角度，以捕捉最大光照强度。

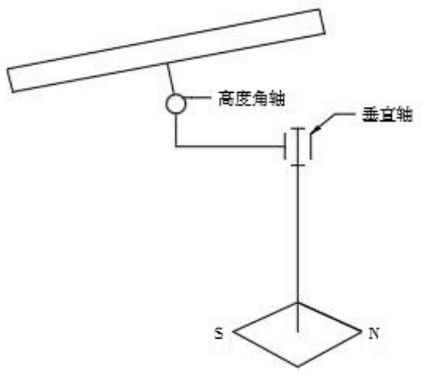



图1 单电机驱动的方位角型双轴跟踪系统

**Fig. 1 Azimuth-type dual-axis tracking system driven by a single motor**

文献[14]在文献[10]的基础上，提出一种改进设计，形成准双轴跟踪支架，如图2所示。该支架的机械传动系统由锥齿轮、凸轮机构和推杆构成，其中锥齿轮将步进电机的旋转动力传递至垂直轴，驱动日周期运动；凸轮轮廓曲线通过推杆调节光伏板倾斜角度，实现高度角的季节性调整。该支架通过锥齿轮与凸轮的协同作用，兼顾日周期跟踪与季节优化，大大提升了系统的整体效率。

## 2 准双轴光伏跟踪支架的天文算法建模与辐射量仿真

本文基于PVsyst软件开展准双轴跟踪支架的辐射量仿真。由于该软件未内置准双轴跟踪

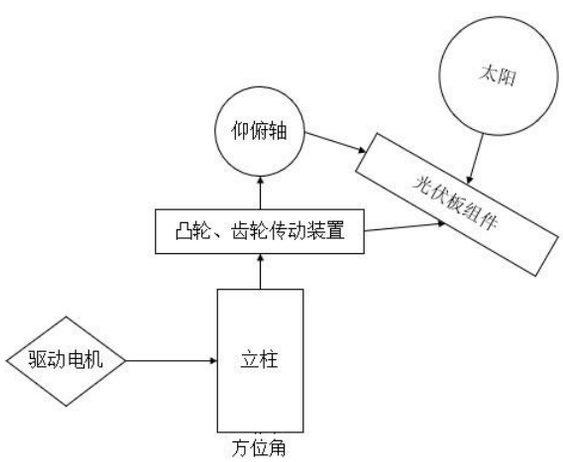



图2 准双轴光伏跟踪支架

**Fig. 2 Quasi-dual-axis PV tracking mounts**

模型，需要通过模型替换与参数映射的方法重构固定支架参数框架，动态替换并修正光伏板高度角与方位角参数，构建准双轴跟踪支架的等效模型，实现全年辐射量的量化评估。

### 2.1　模型替换与动态参数映射

为构建准双轴光伏跟踪支架的等效仿真模型并实现辐射量估算，需在PVsyst平台中完成高度角与方位角的数据提取和地理参数配置。

基于文献[14]提出的天文算法及准双轴机构适配模型（图2），采用数值插值法生成逐时光伏板高度角与方位角的动态曲线，如图3所示；基于Meteonorm 8.1数据库，选取典型气候区作为研究对象，通过PVsyst平台自动匹配目标区域的经纬度坐标及典型气象条件如云量、温湿度等，并仿真目标区域的年均辐射量。

在完成地理参数配置后，采用以下策略实现准双轴跟踪支架的等效建模：以固定倾角采光面模型为基础框架，通过动态参数替换策略模拟准双轴跟踪行为，解决软件中无现成模型的兼容性问题；定义高度角 $T$ 与方位角 $A$ 为光伏板的双自由度控制参数，按时间序列输入，遵循“高度角优先调整，方位角次级修正”的顺序，匹配机构运动学特性；基于图3轨迹图，导出逐时角度数组（图4），再通过编程逐帧注入采光面朝向模块、离散时间步长迭代，生成角度响应模型，最终实现动态参数驱动。

### 2.2　辐射量仿真

基于动态参数映射结果，选取中国武汉（经度 114.381 39°，纬度 30.583 821°）作为研究区域，于2024年9月10日开展典型日辐射量仿真。

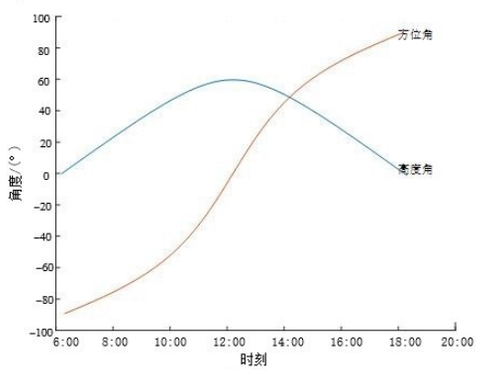



图3　准双轴光伏跟踪支架跟踪轨迹图

**Fig. 3　Tracking trajectory diagram of quasi-dual-axis PV tracking mounts**

仿真流程如下：

1）参数注入与仿真执行

通过离散时间步长 $\Delta_t$ = 1 h 迭代注入动态高度角-方位角参数至PVsyst采光面朝向模块；针对每个时间步长的双变量参数组合，调用软件内置的性能分析模块计算光伏组件的逐时能量输出，实现准双轴跟踪支架的动态响应模拟。

2）辐射量数据提取

根据PVsyst生成的逐时数据图，提取支架的瞬时辐射量，如表1所示。

## 3　准双轴光伏跟踪支架的跟踪轨迹优化及辐射量仿真

### 3.1　轨迹优化方法

传统固定轨迹设计通常假设支架在单一时间窗口内保持固定的高度角-方位角组合，但受限于太阳高度角与方位角的连续变化，此类静态

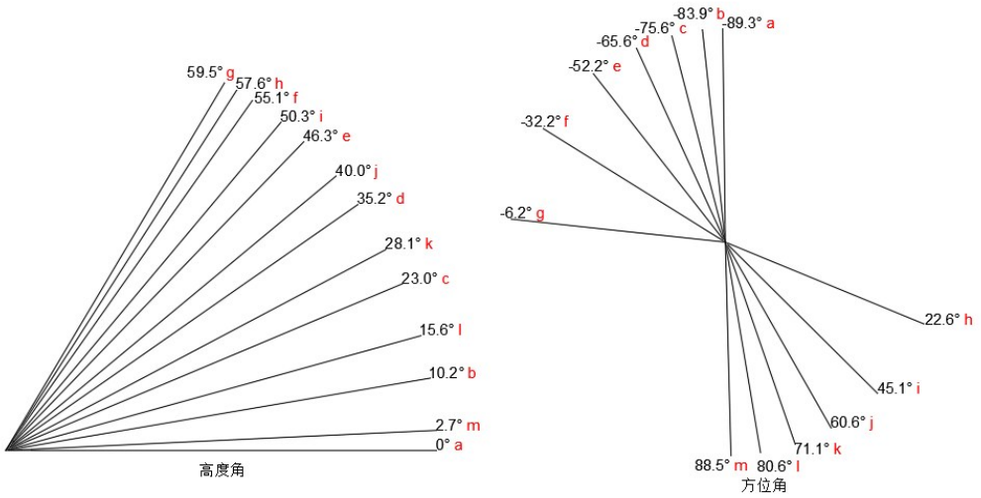



图4　光伏板的逐时角度数组图

**Fig. 4　Hourly angle array diagram of photovoltaic panels**

表1　准双轴光伏跟踪支架仿真辐射量

Table 1　Simulation radiation quantity of quasi-dual-axis photovoltaic tracking mounts

| 时刻 | $(T,A)$ | 准双轴跟踪支架辐射量/(W·m$^{-2}$) |
|---|---|---|
| 7:00 | (0°,−89.3°)a | 6.84 |
| 8:00 | (10.2°,−83.9°)b | 9.11 |
| 9:00 | (23.0°,−75.6°)c | 15.10 |
| 10:00 | (35.2°,−65.6°)d | 15.80 |
| 11:00 | (46.3°,−52.2°)e | 17.00 |
| 12:00 | (55.1°,−32.2°)f | 17.20 |
| 13:00 | (59.5°,−6.2°)g | 17.70 |
| 14:00 | (57.6°,22.6°)h | 16.60 |
| 15:00 | (50.3°,45.1°)i | 16.00 |
| 16:00 | (40.0°,60.6°)j | 12.50 |
| 17:00 | (28.1°,71.1°)k | 5.90 |
| 18:00 | (15.6°,80.6°)l | 3.00 |
| 总和 | | 152.75 |

跟踪模式在月度、年度的测量中将导致显著的辐射量损失。图2中构建的准双轴机构适配模型，虽然可以生成动态的高度角−方位角响应模型，但也只能按照固定的数组角度来接受太阳辐射量。本文在前文构建的准双轴光伏跟踪支架动态模型基础上，提出一种基于辐射量最大化的轨迹优化策略，即通过动态调整光伏板的组件姿态(高度角$T$与方位角$A$)，在满足机械运动学约束的前提下，通过多目标优化方法对准双轴跟踪轨迹进行动态优化，实现太阳辐射捕获效率的最大化。具体优化方法如下：

首先对准双轴光伏跟踪支架光伏板的高度角$T$与方位角$A$数组进行逐时采样，构建时间−角度矩阵$\boldsymbol{S}=\{T_t,A_t\}_{t=1^\circ}^{12\,\mathrm{h}}$；通过PVsyst仿真模块计算每组姿态对应的瞬时辐射量$R(t,T,A)^*$，建立辐射量−角度映射关系；将时间点与对应的角度−辐射量组合存储为结构化数据表，在每个时间步长$\Delta_t=1\,\mathrm{h}$内，遍历所有可能的$(T,A)$组合，计算对应的辐射量$R(t,T,A)^*$；提取各时间点的最大辐射量，确定最优角度$(T,A)^*=\arg\max_{T,A}\left[R(t,T,A)\right]$；将优化后的角度序列$\boldsymbol{S}=\{T_t,A_t\}_{t=1^\circ}^{12\,\mathrm{h}}$构成日跟踪轨迹。

### 3.2　轨迹优化后的轨迹跟踪

由于太阳高度角与方位角日间变化显著，准双轴跟踪支架的轨迹优化受限于机械结构刚性，难以实现每一天各时点机械轨迹的灵活调整。为此，基于上述日测量辐射量及轨迹数据，本文进一步提出一种适用于长期运行的准双轴光伏跟踪支架动态轨迹优化策略，即用PVsyst软件自动匹配目标区域的经纬度坐标及典型气象条件如云量、温湿度等，再用天文算法及功能强大的计算软件如MATLAB、python等计算逐时太阳坐标，列出太阳高度角与方位角所对应准双轴跟踪系统的高度角与方位角，再将相应的准双轴跟踪系统的高度角与方位角组合生成逐日可调的跟踪路径。

根据上述方法，得到2024年9月10日武汉各时点轨迹优化后的跟踪轨迹，如图5所示。

### 3.3　轨迹优化后的日辐射量仿真

根据上述优化方法，仍以2024年9月10日的武汉为例，对9月10日准双轴光伏跟踪支架光伏板的高度角$T$与方位角$A$数组进行逐时采样，并利用PVsyst仿真模块进行计算，在遍历所有可能的$(T,A)$组合后，得到9月10日轨迹优化后辐射量的仿真结果，如表2所示。从表2中提取各时点的最大辐射量及其对应的光伏板高度角$T$与方位角$A$数组，结果如表3所示。

由表1可知，9月10日优化前各时间点的仿真总辐射量为152.75 W/m$^2$；由表3可知，优化后各时间点的仿真最大辐射量之和为174.99 W/m$^2$，显然优化后各时间点的最大辐射量之和比优化前的总辐射量高14.56%。

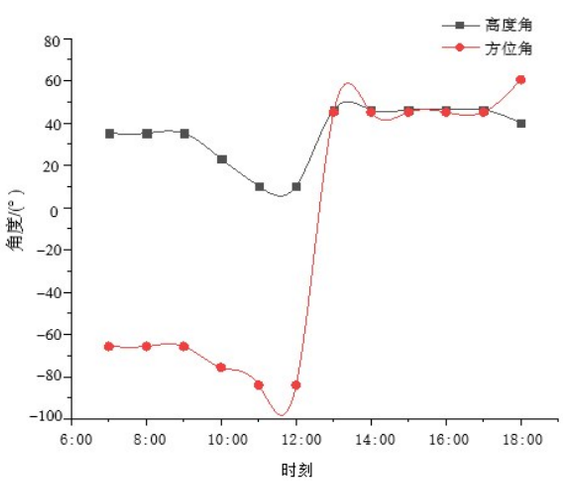



图5　9月10日轨迹优化后的跟踪轨迹图

Fig. 5　The tracking trajectory diagram after trajectory optimization on September 10th

表 2　9 月 10 日一天所有角度仿真辐射量表

Table 2　Simulated radiation quantity table of all angles for the entire day of September 10th　W/m²

| 时刻 | a | b | c | d | e | f | g | h | i | j | k | l |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7:00 | 6. 84 | 8. 90 | 10. 50 | 10. 74 | 9. 42 | 4. 77 | 1. 56 | 1. 58 | 1. 60 | 1. 60 | 1. 68 | 4. 00 |
| 8:00 | 11. 38 | 9. 11 | 14. 94 | 15. 18 | 13. 90 | 9. 47 | 3. 80 | 2. 34 | 2. 31 | 2. 96 | 5. 51 | 8. 56 |
| 9:00 | 13. 27 | 13. 57 | 15. 10 | 15. 35 | 14. 50 | 11. 70 | 8. 12 | 6. 14 | 6. 31 | 7. 78 | 9. 68 | 11. 58 |
| 10:00 | 17. 55 | 14. 60 | 19. 27 | 15. 80 | 18. 70 | 16. 50 | 13. 34 | 11. 33 | 11. 38 | 12. 74 | 14. 40 | 16. 01 |
| 11:00 | 17. 04 | 18. 66 | 17. 55 | 17. 45 | 17. 00 | 16. 37 | 15. 02 | 14. 18 | 14. 27 | 14. 95 | 15. 73 | 16. 42 |
| 12:00 | 17. 22 | 17. 43 | 16. 55 | 16. 30 | 16. 40 | 17. 20 | 17. 01 | 16. 94 | 17. 07 | 17. 31 | 17. 42 | 17. 34 |
| 13:00 | 16. 05 | 17. 00 | 17. 02 | 17. 98 | 17. 60 | 16. 90 | 17. 70 | 18. 34 | 18. 49 | 18. 32 | 17. 84 | 17. 01 |
| 14:00 | 13. 68 | 14. 97 | 14. 00 | 13. 52 | 14. 10 | 16. 02 | 17. 00 | 16. 60 | 18. 60 | 18. 10 | 17. 06 | 15. 46 |
| 15:00 | 9. 52 | 11. 73 | 9. 98 | 9. 20 | 10. 20 | 13. 84 | 13. 75 | 15. 72 | 16. 03 | 15. 32 | 13. 89 | 11. 84 |
| 16:00 | 5. 08 | 7. 04 | 4. 98 | 4. 18 | 5. 20 | 5. 35 | 10. 55 | 13. 08 | 13. 46 | 12. 50 | 10. 64 | 8. 04 |
| 17:00 | 1. 29 | 2. 43 | 1. 95 | 1. 97 | 1. 98 | 1. 27 | 5. 74 | 8. 20 | 8. 58 | 7. 67 | 5. 90 | 3. 50 |
| 18:00 | 2. 56 | 1. 13 | 1. 13 | 1. 12 | 1. 10 | 1. 00 | 1. 31 | 3. 70 | 3. 01 | 3. 20 | 3. 02 | 3. 00 |

注:表中 a 表示(0°,-89. 3°),b 表示(10. 2°,-83. 9°),c 表示(23. 0°,-75. 6°),d 表示(35. 2°,-65. 6°),e 表示(46. 3°,-52. 2°),f 表示(55. 1°,-32. 2°),g 表示(59. 5°,-6. 2°),h 表示(57. 6°,22. 6°),i 表示(50. 3°,45. 1°),j 表示(40. 0°,60. 6°),k 表示(28. 1°,71. 1°),l 表示(15. 6°,80. 6°)。

表 3　准双轴光伏跟踪支架轨迹优化后各时点的仿真最大辐射量

Table 3　Simulated maximum radiation quantity at each time point after trajectory optimization of quasi-dual-axis PV tracking mounts

| 时刻 | (*T*,*A*) | 轨迹优化后辐射量/(W·m⁻²) |
|---|---|---|
| 7:00 | (35. 2°,-65. 6°) | 10. 74 |
| 8:00 | (35. 2°,-65. 6°) | 15. 18 |
| 9:00 | (35. 2°,-65. 6°) | 15. 35 |
| 10:00 | (23. 0°,-75. 6°) | 19. 27 |
| 11:00 | (10. 2°,-83. 9°) | 18. 66 |
| 12:00 | (10. 2°,-83. 9°) | 17. 43 |
| 13:00 | (50. 3°,45. 1°) | 18. 49 |
| 14:00 | (50. 3°,45. 1°) | 18. 60 |
| 15:00 | (50. 3°,45. 1°) | 16. 03 |
| 16:00 | (50. 3°,45. 1°) | 13. 46 |
| 17:00 | (50. 3°,45. 1°) | 8. 58 |
| 18:00 | (40. 0°,60. 6°) | 3. 20 |
| 总和 | | 174. 99 |

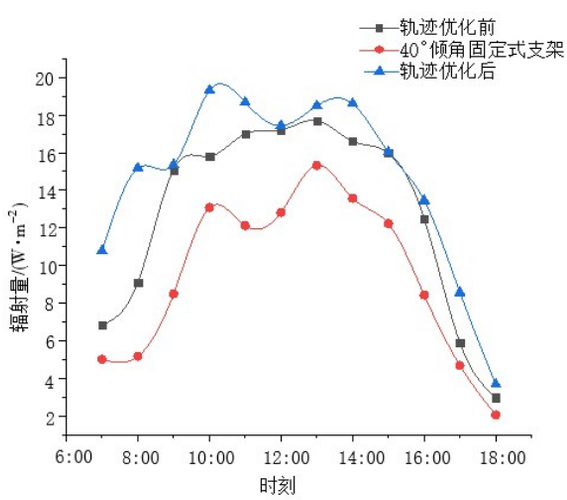



图 6　轨迹优化前、后及固定式支架的仿真辐射量对比

Fig. 6　Comparison of simulated radiation quantity between pre-trajectory optimization, post-trajectory optimization and fixed mounts

将表 1 与表 3 中的数据一起作图于图 6,形成准双轴跟踪支架轨迹优化前后仿真得到的辐射量对比。为了便于比较,将 40°倾角(较理想的倾角)的固定式支架仿真得到的辐射量逐时数据(表 4)也作图于图 6。

由图 6 可知,轨迹优化后仿真得到的各时点辐射量均高于优化前的数据,也显著高于 40°倾角的固定式支架仿真得到各时点的辐射量。

### 3. 4　全年辐射量的仿真比较

为进一步比较轨迹优化前后准双轴光伏跟踪支架的性能,本文结合 Meteonorm 8. 1 气象数据库提供的典型气象年数据,基于 PVsyst 软件对轨迹优化前后的准双轴光伏跟踪支架开展年度辐射量仿真分析,模拟 2024 年全年(1 月 1 日—12 月 31 日)不同日期与气象条件下光伏组件的总辐射量,结果如表 5 所示。为便于比较,将 40°倾角的固定式支架的仿真总辐射量也列示于表 5。

表 4　40°倾角的固定式支架的仿真辐射量

**Table 4　Simulated radiation quantity of fixed mounts with a 40° tilt angle**

| 时刻 | 辐射量/(W·m$^{-2}$) |
|---|---|
| 7:00 | 5.03 |
| 8:00 | 5.18 |
| 9:00 | 8.51 |
| 10:00 | 13.08 |
| 11:00 | 12.13 |
| 12:00 | 12.83 |
| 13:00 | 15.33 |
| 14:00 | 13.58 |
| 15:00 | 12.23 |
| 16:00 | 8.45 |
| 17:00 | 4.70 |
| 18:00 | 2.07 |
| 总和 | 113.12 |

表 5　光伏组件每月接收的太阳辐射能量仿真总值

**Table 5　Simulated total value of solar radiation energy received by PV modules monthly　W/m²**

| 月份 | 准双轴光伏跟踪支架 | | 40°倾角固定式支架 |
|---|---|---|---|
| | 轨迹优化前 | 轨迹优化后 | |
| 1 | 86 623.1 | 94 182.3 | 78 772.5 |
| 2 | 72 866.5 | 79 711.9 | 68 493.0 |
| 3 | 121 467.4 | 130 091.7 | 111 153.9 |
| 4 | 134 451.8 | 141 763.1 | 120 985.6 |
| 5 | 145 086.2 | 153 841.6 | 129 312.1 |
| 6 | 134 904.5 | 140 863.4 | 119 761.3 |
| 7 | 169 036.8 | 175 913.2 | 147 896.3 |
| 8 | 166 635.7 | 173 650.8 | 145 385.4 |
| 9 | 147 920.5 | 153 770.0 | 130 769.6 |
| 10 | 123 623.4 | 133 646.4 | 112 454.5 |
| 11 | 100 583.5 | 113 005.5 | 91 248.5 |
| 12 | 84 884.2 | 91 381.3 | 77 401.8 |

根据表 5 光伏组件每月接收的太阳辐射能量仿真总值，得到光伏组件每月接收的太阳辐射能量仿真的变化曲线，如图 7 所示。由表 5、图 7 可知，轨迹优化后的准双轴光伏跟踪支架各月接收的太阳辐射能量总值均大于优化前的辐射量，也显著高于 40°倾角的固定式支架的辐射量。

## 4　实验验证

为验证准双轴光伏跟踪支架轨迹优化前后，

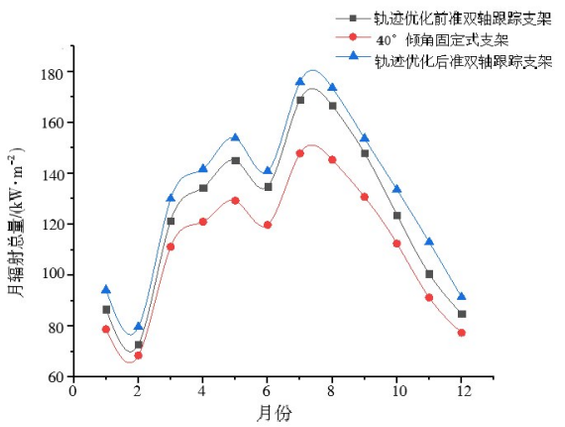


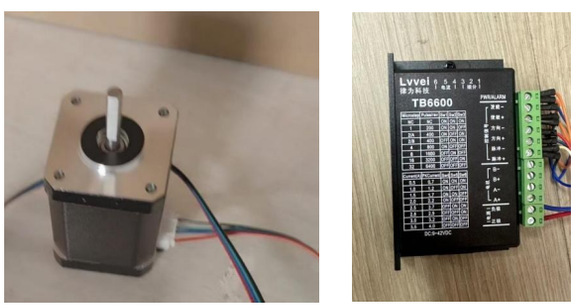

图 7　光伏组件月接收太阳辐射量变化曲线比较

**Fig. 7　Comparison of monthly variation curves of solar radiation received by PV modules**

以及固定式支架(倾角为 40°，正南方向)接收太阳能的效果，于 2024 年 9 月 9 日 7:00—18:00、2024 年 9 月 10 日 7:00—18:00(这两天天气晴朗)在武汉纺织大学(经度 114.381 39°，纬度 30.583 821°)对准双轴光伏跟踪支架轨迹优化前后，以及固定式支架的光伏组件接收效果进行了对比。实验使用的步进电机及其驱动器如图 8 所示。

图 8 中，步进电机型号为 42BYG60D，电机长 60 mm、轴径 5 mm，电流 1.5 A，力矩 0.7 N·m；步进电机驱动器型号为 TB6600，升级版驱动器输入电压 9～42 V，输出电流 0.5～4.0 A，脉冲细分 6 400 步/转。实验时，将轨迹优化算法生成的动态角度序列输入控制器，控制器依据实时太阳位置输出驱动信号，协调电机动作实现对太阳高度角与方位角的动态精准跟踪。

测试现场如图 9 所示。由于准双轴跟踪支架只有 1 个，不能同时进行轨迹优化前后的测量，所以只能分别测量轨迹优化前(9 月 9 日)、后(9 月




a　步进电机　　b　驱动器

图 8　步进电机及其驱动器

**Fig. 8　Stepper motors and their drivers**




图9　试验现场图

**Fig. 9　Test site diagram**

10日）的数据。由于40°倾角的固定式支架在这两天太阳强度测量中数据非常接近，因此本文取9月10日的固定支架测试数据。

在图9的测试中，由于所用的光伏板不变，所以可以通过不同时间点测量的光伏电池板的开路电压和短路电流值，来估算一个大致的功率输出值。经过上述测试，得到准双轴光伏跟踪系统与固定支架系统的输出电压、电流，如表6所示。

根据表6的输出电压、输出电流，得到准双轴跟踪系统与固定支架系统的输出功率，并作图于图10。根据图10输出功率曲线下的面积，可以算

**表6　轨迹优化前后准双轴跟踪支架、40°倾角固定式支架的光伏组件的开路电压与短路电流测量值**

**Table 6　Measured values of open-circuit voltage and short-circuit current of PV modules for quasi-dual-axis tracking mounts and fixed mounts with a 40° tilt angle pre- and post-trajectory optimization**

| 时刻 | 准双轴跟踪支架 | | | | | | 40°倾角固定式支架 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 轨迹优化前 | | | 轨迹优化后 | | | | | |
| | 电压/V | 电流/A | 功率/W | 电压/V | 电流/A | 功率/W | 电压/V | 电流/A | 功率/W |
| 7:00 | 19.7 | 0.27 | 5.32 | 19.9 | 0.29 | 5.77 | 19.9 | 0.20 | 3.98 |
| 8:00 | 21.3 | 0.32 | 6.82 | 21.5 | 0.36 | 7.74 | 21.7 | 0.29 | 6.29 |
| 9:00 | 22.2 | 0.43 | 9.55 | 22.3 | 0.45 | 10.04 | 21.9 | 0.31 | 6.79 |
| 10:00 | 22.8 | 0.48 | 10.94 | 22.9 | 0.49 | 11.22 | 22.9 | 0.43 | 9.85 |
| 11:00 | 22.9 | 0.54 | 12.37 | 22.9 | 0.57 | 13.05 | 22.6 | 0.44 | 9.94 |
| 12:00 | 22.9 | 0.60 | 13.74 | 23.0 | 0.61 | 14.03 | 22.6 | 0.53 | 11.98 |
| 13:00 | 22.8 | 0.61 | 13.91 | 22.9 | 0.61 | 13.97 | 22.4 | 0.46 | 10.30 |
| 14:00 | 22.5 | 0.56 | 12.60 | 22.6 | 0.58 | 13.11 | 22.4 | 0.40 | 8.96 |
| 15:00 | 22.1 | 0.49 | 10.83 | 22.3 | 0.51 | 11.37 | 22.0 | 0.30 | 6.60 |
| 16:00 | 21.9 | 0.32 | 7.01 | 22.1 | 0.43 | 9.50 | 21.8 | 0.19 | 4.14 |
| 17:00 | 21.5 | 0.21 | 4.52 | 21.6 | 0.29 | 6.26 | 21.7 | 0.17 | 3.69 |
| 18:00 | 20.6 | 0.10 | 2.06 | 20.6 | 0.13 | 2.68 | 20.2 | 0.08 | 1.62 |
| 总和 | | | 109.65 | | | 118.75 | | | 84.14 |

出准双轴跟踪支架轨迹优化前后及40°倾角的固定式支架的输出功率分别为109.65、118.75、84.14 W，即优化后的准双轴跟踪支架比优化前的输出功率提高了8.30%，比固定式支架提高了41.13%。

由于前文仿真中得到的都是辐射量，为便于比较，也需要把本文测试得到的输出功率转化为相应的辐射量。根据文献[17]，得到光伏板输出功率与辐射量的关系为

$$p = \eta \times S \times I \tag{5}$$

式中：$\eta$是光伏板的转换效率；$S$是光伏板的受光面积，$m^2$；$I$是太阳辐射强度，$Wh/(m^2 \cdot d^{-1})$。

在本文测试中，光伏板的受光面积$S$=0.147

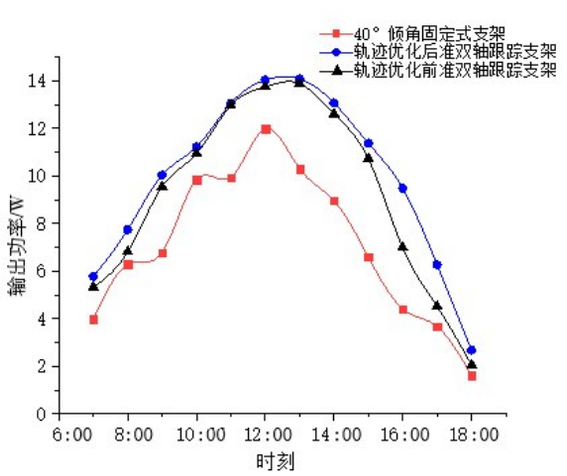



图10　输出功率曲线图

**Fig. 10　Output power curve graph**

$m^2$,光伏板的转换效率$\eta$取18%,根据公式(5)及表6,得到准双轴跟踪支架轨迹优化前后及40°倾角的固定式支架的每时点辐射量,如表7所示。

由表7可知,实际测量后得到准双轴跟踪支架轨迹优化前后及40°倾角的固定式支架每天的太阳辐射量分别为172.67、186.99、132.50 W/$m^2$,即优化后的准双轴跟踪支架比优化前提高了8.29%,比固定式支架提高了41.12%。

**表7　轨迹优化前后准双轴跟踪支架及40°倾角固定式支架的每时点的辐射量**

**Table 7　Radiation amount at each time point for quasi-dual-axis tracking mounts and fixed mounts with a 40° tilt angle pre- and post-trajectory optimization**

| 时刻 | 准双轴跟踪支架 | | | | | 40°倾角固定式支架 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 轨迹优化前 | | 轨迹优化后 | | | |
| | 功率/W | 辐射量/(W·$m^{-2}$) | 功率 | 辐射量/(W·$m^{-2}$) | 功率/W | 辐射量/(W·$m^{-2}$) |
| 7:00 | 5.32 | 8.38 | 5.77 | 9.09 | 3.98 | 6.27 |
| 8:00 | 6.82 | 10.73 | 7.74 | 12.19 | 6.29 | 9.91 |
| 9:00 | 9.55 | 15.03 | 10.04 | 15.80 | 6.79 | 10.69 |
| 10:00 | 10.94 | 17.23 | 11.22 | 17.67 | 9.85 | 15.51 |
| 11:00 | 12.37 | 19.47 | 13.05 | 20.55 | 9.94 | 15.66 |
| 12:00 | 13.74 | 21.64 | 14.03 | 22.09 | 11.98 | 18.86 |
| 13:00 | 13.91 | 21.90 | 13.97 | 22.00 | 10.30 | 16.23 |
| 14:00 | 12.60 | 19.84 | 13.11 | 20.64 | 8.96 | 14.11 |
| 15:00 | 10.83 | 17.05 | 11.37 | 17.91 | 6.60 | 10.39 |
| 16:00 | 7.01 | 11.04 | 9.50 | 14.96 | 4.14 | 6.52 |
| 17:00 | 4.52 | 7.11 | 6.26 | 9.86 | 3.69 | 5.81 |
| 18:00 | 2.06 | 3.24 | 2.68 | 4.22 | 1.62 | 2.54 |
| 总和 | 109.65 | 172.67 | 118.75 | 186.99 | 84.14 | 132.50 |

## 5　结论

针对太阳能光伏发电系统中,传统双轴跟踪系统成本高、运维复杂及固定支架效率低的问题,本文提出了一种基于天文算法与软件仿真的准双轴光伏跟踪支架轨迹优化方法。该方法通过天文算法计算太阳高度角与方位角,并结合PVsyst软件构建等效模型,在无需硬件改造的前提下通过软件驱动调整轨迹,实现轨迹优化,有效解决了传统双轴跟踪系统成本高、运维复杂的问题。仿真与实验结果表明,轨迹优化后准双轴支架的辐射量较轨迹优化前均有了大幅提升,提升率分别为14.56%、8.29%。

该方法突破传统机械结构限制,在保持双轴跟踪优势的同时降低设备复杂度和维护成本,为光伏系统的智能化升级提供了技术路径。

**参考文献:**


[1] 李芬, 张德隆, 毛玲, 等. 基于天气类型划分的单轴轨道式光伏跟踪策略[J]. 电源技术, 2023, 47(11): 1485-1489.

[2] AL-ROUSAN N, MATISA N A, MATDESA M K. Efficient single and dual axis solar tracking system controllers based on adaptive neural fuzzy inference system[J]. Journal of King Saud Universit:Engineering Sciences, 2020, 32(7): 459-469.

[3] JAMROEN C, KOMKUM P, KOHSRI S, et al. A low-cost dual-axis solar tracking system based on digital logic design: Design and implementation[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020, 37: 100618.

[4] 李联友, 李昕, 李栎冬, 等. 基于分布固定式光伏发电阵列MPPT的最佳倾角模拟分析[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2023, 39(1): 29-35.

[5] 侯慧, 罗俊阳, 李大虎, 等. 双面光伏发电装置的双轴支架结构与控制策略[J]. 电源技术, 2019, 43(5): 825-828.

[6] 孙婷, 赵子涵, 赵永彬. 光伏发电双轴自动跟踪控制系统的设计与应用[J]. 自动化仪表, 2021, 42(6): 91-95.

[7] 张兴, 贺广零, 王启志, 等. 新型双轴跟踪光伏发电技术[J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 19-28.
[8] SABRAN R U, FAJARDO A C. Sunflower inspired solar tracking strategy: a sensorless approach for maximizing photovoltaic panel energy generation[C]//2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). November 29-December 2, 2018, Baguio City, Philippines. IEEE, 2018: 1-6.
[9] 张维佳. 中国光伏行业协会上调今年装机预测[N]. 中国电子报,2024-12-10(005).
[10] ALEXANDRU C. Modelling and simulation of a single-motor bi-axial sun tracking mechanism[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1256(1): 012021.
[11] MAHESH K, JOSHI MANOHAR V, KUMAR D G, et al. Design of 20 kwp solar PV system with different tracking systems using PVsyst and sketch-up[C]// Smart Energy and Advancement in Power Technologies. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 607-620.
[12] 王映斐. 光伏发电可变端点最优轨迹法的最大功率点跟踪新策略研究[J]. 农村电气化, 2023(5): 62-67.
[13] 顾文兵, 杨福胜. 基于单轴跟踪式光伏支架的光伏阵列优化设计[J]. 太阳能, 2024(12): 97-104.
[14] LIU Y K, XIAO Z Q, HUANG Y, et al. Design and analysis of a quasi-biaxial solar tracker[J]. Energies, 2025, 18(6): 1554.
[15] COOPER D B. A simplified solar vector calculation: NASA TN D-5803[R]. Hampton: NASA Langley Research Center, 1970.
[16] MEEUS J. Astronomical algorithms[M]. 2nd ed. Richmond: Willmann-Bell, 1998: 184-185.
[17] ZHANG S, CHEN X, XU J M , et al. Advanced industrial high-efficiency silicon PV module design[J]. Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications, 2024 ,2: 333-355.

# Optimization Design of Tracking Trajectory for Quasi-dual-axis Photovoltaic Tracking Mounts

MA Yubo, XIAO Zhiquan
(School of Mechanical Engineering & Automation, Wuhan Textile University, Wuhan Hubei　430023 , China)

**Abstract**: To address the issues of high cost, complex operation and maintenance of traditional dual-axis tracking systems, and low efficiency of fixed supports in photovoltaic (PV) power generation systems, this paper proposes a trajectory optimization method for quasi-dual-axis PV tracking supports based on astronomical algorithms and software simulation. This method calculates the solar altitude angle and azimuth angle using astronomical algorithms, and constructs an equivalent model in combination with PVsyst software. Without the need for hardware modification, it adjusts the trajectory through software-driven control to achieve trajectory optimization, effectively solving the problems of high cost and complex operation and maintenance of traditional dual-axis tracking systems. Simulation and experimental results show that the radiation amount of the quasi-dual-axis support after trajectory optimization is significantly increased compared with that before trajectory optimization, with an increase rate of 14.56% and 8.29% respectively.

**Keywords**: quasi-dual-axis; tracking mount; radiation quantity simulation; trajectory optimization

(责任编辑:李华云)