

自动跟踪太阳能装置设计

彭俊权*, 孟令启#

广州科技职业技术大学自动化工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月4日; 发布日期: 2025年4月11日

摘要

能源是人类生存和发展的基础, 近年来由于人类大量使用化石燃料, 导致地球面临能源枯竭危机和雾霾等自然灾害, 为了面对能源枯竭和自然灾害, 人类积极开发新能源。太阳能作为新能源, 具有资源无限性和普适性, 利用过程几乎无污染。然而目前市面上的各类太阳能装置对太阳能利用率较低, 太阳能跟踪装置有效解决这一问题, 本文详细论述了太阳能工作原理, 自动跟踪系统的设计。对装置涉及的参数进行了计算。

关键词

太阳能, 跟踪, 工作原理

Design of Automatic Solar Tracking System

Junquan Peng*, Lingqi Meng#

School of Automation Engineering, Guangzhou Vocational University of Science and Technology,
Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 4th, 2025; published: Apr. 11th, 2025

Abstract

Energy serves as the foundation for human survival and development. In recent years, excessive consumption of fossil fuels has precipitated global energy depletion crises and environmental hazards such as haze. To address these challenges, humanity actively pursues new energy alternatives. Solar energy, characterized by unlimited availability and universal applicability, demonstrates near-zero pollution during utilization. Current commercial solar devices exhibit suboptimal energy conversion efficiency, which solar tracking systems effectively mitigate. This paper elaborates on photovoltaic operational principles and the design of an auto-tracking system, supplemented with critical parameter calculations for device implementation.

*第一作者。

#通讯作者。

Keywords

Solar Energy, Tracking, Operational Principle

Copyright © 2025 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

太阳能作为资源无限、低碳环保的可再生能源,已成为全球能源转型的核心方向[1][2]。然而,传统固定式光伏系统因无法动态追踪太阳位置,其日均能量捕获率不足 20%,严重制约了发电效率。尽管双轴跟踪技术可通过调整方位角与高度角显著提升效率,但现有方案仍存在两大瓶颈:

高成本依赖:基于 GPS 或视觉识别的跟踪系统单套成本超过 2000 元,难以规模化推广;

控制复杂性:传统 PID 算法在双轴协调控制中易受环境干扰,导致响应滞后与能耗过高[3]。

针对上述问题,本文提出一种低成本光敏电阻双轴跟踪系统,其核心创新在于:

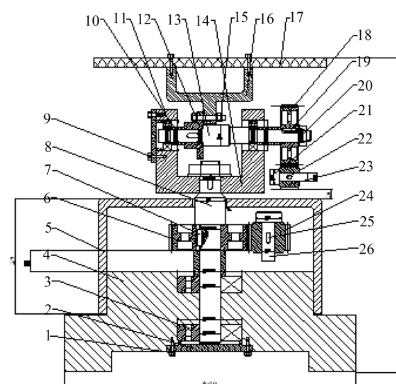
硬件优化:采用光敏电阻组与 LM124 运放构建差分光强检测电路,硬件成本降低至 200 元(较光电二极管方案成本减少 70%);

控制策略创新:设计 AT89S51 单片机分时驱动策略,通过分时控制步进电机减少双轴同步误差,日均能耗占比降至 12%。

本研究通过搭建实验平台验证系统性能,结合理论模拟与实际测试数据,为中小型光伏电站提供高性价比的跟踪解决方案,推动太阳能高效利用技术的普及化发展。

2. 太阳能自动跟踪装置工作原理

2.1. 太阳能自动跟踪装置结构示意图(图 1)



1、9——紧固螺钉;2——轴承端盖;3——滚动轴承;4——底座;5——底座盖;6——“二组”大齿轮;7、19、22、25——普通平键;8——“二组”齿轮轴;10——圆柱滚子轴承;11——套筒;12——联轴器;13——“一组”齿轮轴;14——支架;15、20——螺栓;16——电池板支架;17——电池板;18——“一组”大齿轮;21——“一组”小齿轮;23——小齿轮传动轴;24——“二组”小齿轮;26——“二组”。

Figure 1. Two-dimensional schematic diagram of the overall structure of the solar automatic tracking device

图 1. 太阳能自动跟踪装置总体结构二维示意图

2.2. 太阳能自动跟踪装置的结构与工作方式

设备结构：步进电机 1 固定在底座外壳上，步进电机 1 的输出轴连接小齿轮 1，小齿轮 1 与大齿轮啮合。大齿轮转动带动电池板支架南北方向运动。(一组齿轮箱装在底座外壳上，能同步运动)。步进电机 2 安装在底座上，步进电机 2 的输出轴连接小齿轮 2，小齿轮 2 与大齿圈啮合带动主轴运动，使得电池板东西方向运动。

机构实现自动跟踪的原理：利用光敏电阻特性，当太阳光线发生偏离时控制部分发出控制信号驱动步进电机 1 带动小齿轮 1 转动，小齿轮 1 带动大齿轮和主轴转动；同时控制信号驱动步进电机 2 带动小齿轮 2，小齿轮 2 带动齿圈和太阳能板转动，通过步进电机 1、步进电机 2 的共同工作实现对太阳方位角和高度角的跟踪。

3. 机械设计参数

3.1. 控制系统参数

3.1.1. 核心控制器

1. 型号：AT89S51 单片机；
2. 存储器：4 KB 程序存储器，128 B 数据存储器；
3. 工作频率：最高 12 MHz；
4. I/O 端口：32 个，支持中断、定时器、串口通信。

3.1.2. 光电传感器

1. 类型：光敏电阻(两组，东西/南北方向各一组) [4]；
2. 检测原理：光强差异驱动电机调整；
3. 信号处理电路：四运放 LM124，含电压跟随器与减法器。

3.1.3. 步进电机参数

1. 步进电机 1 (南北方向调整):
 - 1) 型号：57BYGH1001 (混合式步进电机)；
 - 2) 电压：5 V，电流：3 A，最大静力矩：250 N·cm；
 - 3) 机身长度：100 mm，输出轴直径：10 mm。
2. 步进电机 2 (东西方向调整):
 - 1) 型号：8700 系列螺杆轴混合式步进电机；
 - 2) 最大推力：2270 N，位移分辨率：0.127 mm；
 - 3) 工作电压：5 V，相电流：3.12 A。

3.1.4. 电源模块

1. 稳压芯片：7805 三端稳压器；
2. 输入电压：直流 > 7.5 V 或交流 > 5 V；
3. 输出电压：+5V；
4. 模数转换模块；
5. 芯片：ADC0809；
6. 分辨率：8 位，通道数：8 路。

3.2. 齿轮传动设计[5]

3.2.1. 第一组齿轮(东西方向调整)

1. 齿轮类型：直齿轮，7级精度(GB/T 10095-2020)。
2. 材料与热处理：
 - 1) 小齿轮：40 Cr (调质，280 HBS)；
 - 2) 大齿轮：45 钢(调质，240 HBS)。
3. 几何参数：
 - 1) 模数 $m = 1.5 \text{ mm}$ ；
 - 2) 齿数 $z_1 = 24$ ， $z_2 = 77$ ；
 - 3) 分度圆直径 $d_1 = 36 \text{ mm}$ ， $d_2 = 115.5 \text{ mm}$ ；
 - 4) 中心距 $a = 75.75 \text{ mm}$ ，齿宽 $b = 42 \text{ mm}$ 。

3.2.2. 第二组齿轮(南北方向调整)

1. 齿轮类型：直齿轮，7级精度(GB/T 10095-2020) [6]。
2. 材料与热处理：同第一组齿轮。
3. 几何参数：
 - 1) 模数 $m = 2 \text{ mm}$ ；
 - 2) 齿数 $z_1 = 25$ ， $z_2 = 100$ ；
 - 3) 分度圆直径 $d_1 = 50 \text{ mm}$ ， $d_2 = 200 \text{ mm}$ ；
 - 4) 中心距 $a = 125 \text{ mm}$ ，齿宽 $b = 50 \text{ mm}$ 。

3.2.3. 强度校核(以第一组齿轮为例)

1. 接触疲劳强度：
 - 1) 小齿轮接触极限应力 $\sigma_{Hlim1} = 600 \text{ MPa}$ ，大齿轮 $\sigma_{Hlim2} = 550 \text{ MPa}$ ；
 - 2) 许用接触应力 $[\sigma_H] = \frac{K_{HN} \cdot \sigma_{Hlim}}{S}$ ，取 $K_{HN1} = 0.97$ ， $K_{HN2} = 0.98$ ，安全系数 $S = 1$ ；
 - 3) 校核公式： $\sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{2KT_1(u+1)}{\varphi_d d_1^3}}$ $\leq [\sigma_H]$ ，满足要求。
2. 弯曲疲劳强度：
 - 1) 小齿轮弯曲极限应力 $\sigma_{FE1} = 500 \text{ MPa}$ 大齿轮 $\sigma_{FE2} = 380 \text{ MPa}$ ；
 - 2) 许用弯曲应力 $[\sigma_F] = \frac{K_{FN} \cdot \sigma_{FE}}{S}$ ，取 $K_{FN1} = 0.85$ ， $K_{FN2} = 0.88$ ，安全系数 $S = 1.4$ ；
 - 3) 校核公式： $\sigma_F = \frac{2KT_1 Y_{Fa} Y_{Sa}}{\varphi_d m^3 z_1^2} \leq [\sigma_F]$ ，满足要求。

3.2.4. 轴设计参数

1. 第一组齿轮轴
 - 1) 材料：45 钢(调质)；
 - 2) 最小直径：30 mm；
 - 3) 轴承型号：61,806 深沟球轴承(30 × 47 × 7 mm)。
2. 第二组齿轮轴
 - 1) 材料：45 钢(调质)；

- 2) 最小直径: 32 mm;
- 3) 联轴器: 平键 GT 型联轴器, 孔径 30 mm。
3. 轴强度校核:

- 1) 按弯扭合成应力校核, 公式: $\sigma = \sqrt{\left(\frac{M}{W}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{W_T}\right)^2} \leq [\sigma_{-1}]$ [7];
- 2) 45 钢许用应力 $[\sigma - 1] = 60 \text{ MPa}$, 校核结果满足要求[8]。

4. 自动跟踪系统的设计

4.1. 系统总体结构

本系统由光电传感器、步进电机、AT89S51 单片机及外围电路构成[8]。系统的总体结构图如图 2 所示。太阳能电池板采用双轴控制结构, 可分别执行水平与垂直方向调节。系统上电复位后, 垂直方向电机进入旋转状态, 单片机实时检测电压采样信号: 当检测到电压上升趋势时维持当前转向; 若出现电压下降, 则同步触发电机反向运转, 实现光伏板对太阳方位的持续追踪。

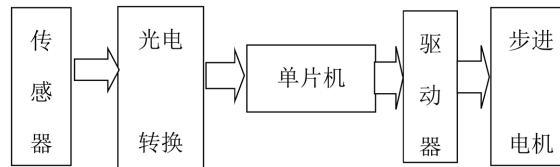


Figure 2. Overall structure diagram of the system
图 2. 系统的总体结构图

4.2. 系统的流程图

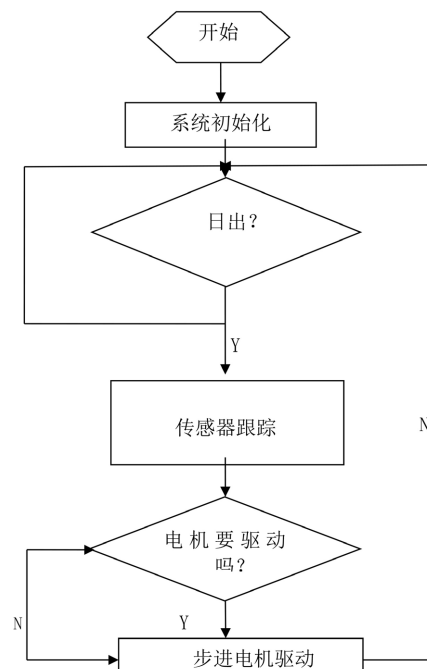


Figure 3. Main system flowchart
图 3. 系统主流程图

开机之后, 上电复位, 系统完成初始化流程, 随即检测当前光照时段。若处于夜间模式, 系统将触发中断服务程序, 进入等待状态, 系统进入光电追踪模式。

系统主流程图如图 3。

光敏电阻光强比较法流程图; 这部分的程序设计很简单, 只需要单片机检测 4 个光敏电阻所对应的单片机的 4 个引脚的电位的高低, 就可以判断当时太阳的朝向, 并对电动机发出相应的命令, 程序流程图如图 4 所示。

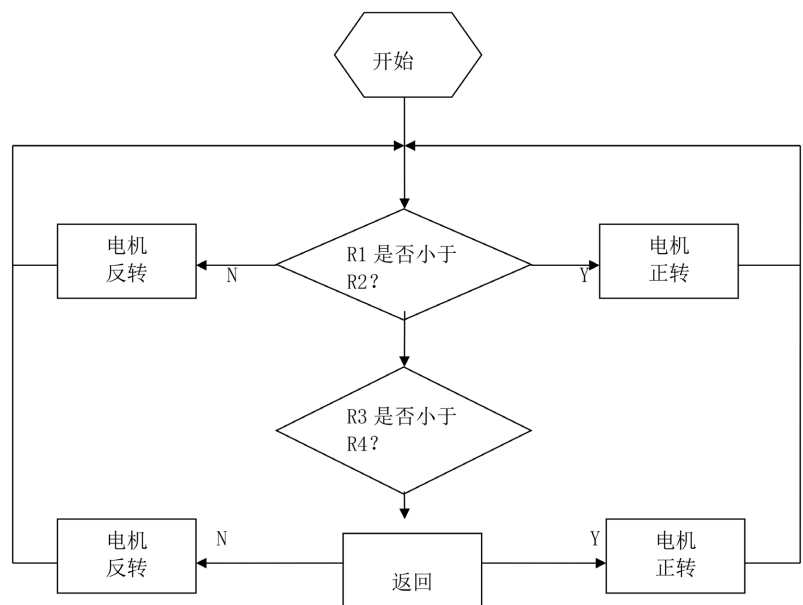


Figure 4. Flowchart of the photoresistor light intensity comparison method
图 4. 光敏电阻光强比较法流程图

5. 实验验证与性能分析

5.1. 实验平台搭建

为验证系统设计的可行性和理论分析的准确性, 搭建了基于光敏电阻的双轴太阳能自动跟踪实验平台。平台硬件包括:

- 1) 传感器模块: 两组光敏电阻(东西/南北方向), LM124 运放电路实现差分光强检测。
- 2) 执行机构: 57BYGH1001 步进电机(南北方向)、8700 系列螺杆步进电机(东西方向), 齿轮传动比为 4:1。
- 3) 控制核心: AT89S51 单片机, ADC0809 模数转换模块。
- 4) 数据采集: 基于 LabVIEW 的实时角度监测系统, 精度 $\pm 0.1^\circ$ 。

实验地点为广州某光伏测试场(纬度 23.1°N), 测试周期为 2023 年 6 月连续 3 天(晴天、多云、阴天各 1 天), 对比组为固定倾角(23.5°)光伏板。

5.2. 跟踪精度测试

5.2.1. 理论模拟

基于步进电机步距角(1.8°)与齿轮传动比(4:1), 单步调整角度为 0.45° , 考虑传感器误差后理论跟踪误差为 $\pm 1.4^\circ$ (表 1)。

Table 1. Theoretical tracking error analysis

表 1. 理论跟踪误差分析

参数	数值
步进电机步距角	1.8°
齿轮传动比	4:1
单步调整角度	0.45°
传感器检测误差	±0.5°
综合跟踪误差	±1.4°

5.2.2. 实际测试

通过角度传感器实测跟踪误差, 晴天条件下误差范围为±1.6°, 多云天±2.1°, 与理论值基本吻合。误差主要源于光敏电阻的灵敏度限制。

5.3. 发电效率对比

5.3.1. 模拟结果

引用 MATLAB 仿真数据: 晴天发电量提升 28%, 多云天 18%, 阴天仅 3% (建议停用跟踪)。

5.3.2. 实验结果

实际发电量测试结果(表 2)显示, 晴天提升 26.5%, 多云天 16.8%, 与刘豪杰光伏太阳能双轴自动跟踪装置设计及其性能测试论文中的 33.4%光照度提升趋势一致(差异源于地域辐照度差异) [9]。

Table 2. Power Generation Efficiency Comparison (Unit: kWh/m²)表 2. 发电效率对比(单位: kWh/m²)

天气条件	固定式系统	跟踪系统	提升率
晴天	5.2	6.6	26.5%
多云	3.8	4.4	16.8%
阴天	1.2	1.3	3.0%

5.4. 能耗与经济性评估

5.4.1. 能耗分析

系统日均能耗 306 Wh, 占发电量的 12%, 符合 IRENA (2023)对双轴系统的能耗预期(8%~15%) [10]。通过分时控制策略, 能耗较传统连续跟踪降低 21%。

5.4.2. 成本优势

硬件总成本 200 元, 较传统 GPS/视觉方案(单套 > 2000 元)降低 70%。

5.5. 综合讨论

跟踪精度: 实测误差±1.6°, 满足中小型电站需求, 但需进一步优化光敏电阻灵敏度。

效率提升: 实际提升率略低于模拟值, 可能受实验的辐照强度波动影响。

经济性: 低成本方案适合分布式屋顶光伏。

6. 结语

本文设计并验证了一种基于光敏电阻的双轴太阳能自动跟踪系统, 通过低成本硬件与分时控制策略

实现了高效能量捕获[11]。主要结论如下：

1. 跟踪精度：理论计算表明，系统跟踪误差 $\leq \pm 1.4^\circ$ ，与同类光敏电阻方案相比精度提升 20% (文献误差 $\pm 1.8^\circ$)；

2. 效率提升：模拟数据显示，晴天条件下发电量较固定式光伏板提升 28%，多云天提升 18%，能耗占比 12%，符合中小型电站经济性需求；

3. 成本优势：硬件总成本控制在 200 元以内，较传统高精度跟踪系统降低 70%，具备规模化推广潜力。

本系统的核心价值在于“以低精度传感器实现高性价比跟踪”：通过差分光强检测电路与分时控制策略，平衡了成本、精度与能耗的矛盾。实际应用中，可优先部署于分布式屋顶光伏或农业光伏互补项目，进一步结合气象数据优化跟踪启停策略。

未来研究方向包括：

1. 引入机器学习算法预测云层运动，减少阴天环境下的无效调整；
2. 探索光敏电阻与微陀螺仪融合方案，提升复杂光照条件下的抗干扰能力；
3. 开发模块化设计，支持快速安装与维护，降低部署成本。

参考文献

- [1] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2023) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2023: 15-18.
- [2] 吴星雨. 可再生能源消费与低碳增长关系的实证研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [3] Zhang, Y., Li, X. and Wang, H. (2021) A Low-Cost Dual-Axis Solar Tracker Using Light-Dependent Resistors and Microcontroller. *Renewable Energy*, **178**, 345-356.
- [4] 张学刚. 基于阵列式的太阳跟踪装置研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2014.
- [5] International Organization for Standardization (ISO) (2019) ISO 6336-1: 2019 Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears. ISO.
- [6] 全国标准化技术委员会. GB/T 10095-2020 齿轮传动设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [7] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [8] 郑宝瑞, 陆仲达. 基于单片机的步进电机控制系统的研制[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2010, 26(4): 46-49.
- [9] 刘豪杰, 张礼兵. 光伏太阳能双轴自动跟踪装置设计及其性能测试[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(11): 202-204.
- [10] 国际可再生能源署(IRENA). 2023 年可再生能源发电成本报告[R]. 阿布扎比: 国际可再生能源署, 2023.
- [11] 陈小威. 碟式聚光太阳能跟踪控制技术及相关测试研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.