

# 太阳能自动跟踪系统研究

葛海浪, 臧勇, 唐友亮, 杨凯程

(宿迁学院 机电工程学院, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:** 太阳能发电具有干净、不会威胁人类和破坏环境的优点, 提高太阳能板发电效率成为当今研究的热点; 以单片机为控制核心, 读取 GPS 的经纬度和当地时间等信息, 根据视日运动轨迹模型精确解算太阳方位角和高度角, 发送相应脉冲驱动步进电机, 经过减速器减速实现对太阳能板的姿态调整, 从而实现对太阳光的精确跟踪; 安装于太阳能板上的姿态传感器可以将姿态信息反馈给控制器从而实现闭环控制, 进一步提高了系统的精度, 安装的风速传感器使太阳能跟踪器具有抗风性能; 实验表明, 太阳能跟踪器可有效跟踪太阳角, 跟踪精度可达到  $2^\circ$  左右, 大大提高了太阳能板的发电效率, 具有很好的应用前景。

**关键词:** GPS; 太阳角; 姿态传感器; 自动跟踪

## Research on Solar Energy Automatic Tracking System

Ge Hailang, Zang Yong, Tang Youliang, Yang Kaicheng

(Electromechanical Engineering Institute, Suqian College, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Solar energy has the advantages of being clean, not threatening human beings and destroying the environment. Improving the efficiency of solar panel power generation has become a hot spot in today's research. With the single-chip microcomputer as the control core, reading the latitude and longitude of GPS and local time, etc., according to the visual trajectory model Calculate the azimuth and elevation angle of the sun, send the corresponding pulse to drive the stepping motor, regulate the attitude of the solar panel through the reducer, so as to achieve accurate tracking of the sunlight. The attitude sensor installed on the solar panel feeds back the attitude information to the controller thus realizes closed-loop control, improve the accuracy of the system. The installed wind speed sensor makes the solar tracker have wind resistance performance. Experiments show that the sun tracker can effectively track the sun angle, and the tracking accuracy is about  $2^\circ$ , and greatly improves the power generation efficiency of the solar panel, and the device has a good application prospects.

**Keywords:** GPS; sun angle; attitude sensor; automatic tracking

## 0 引言

近年来, 人们对太阳能的转换与利用展开了广泛的研究<sup>[1-4]</sup>。关于太阳能的研究主要集中在两个方面: 一种是研究可以提高太阳能转化效率的新型材料; 另一种是设法提高太阳能的接收效率<sup>[5]</sup>; 应用太阳跟踪装置可有效提高太阳能的接收效率, 太阳跟踪器根据跟踪技术分为主动式<sup>[6]</sup>、被动式和混合式<sup>[7]</sup>, 主动跟踪系统利用存储器预存的经纬度参数和实时时钟解算太阳的方位角和高度角<sup>[8]</sup>, 可全天候运行且不受天气影响, 但是结构和算法复杂, 且后期维护成本高; 被动式跟踪多采用传感器探测太阳方位角<sup>[9-10]</sup>, 可以在低成本的情况下获得较高精度, 但是传感器易受天气等情况的干扰, 导致系统工作不稳定; 把以上两种混合就是混合式跟踪方式, 具有以上两种跟踪方式的优点, 但系统会变得复杂且成本较高。基于太阳能跟踪器的以上特点, 本设计基于 STM32F103C8T6 单片机搭建太阳能自动跟踪系统, 采用主动式双轴跟踪方式对太阳进行自动跟踪, 同时与姿态传感器构成闭环控制系统, 在太阳能装置出现

较大偏差时可及时校正高度角和方位角, 具有精度高、适应性强、成本低等优点, 同时安装有风速传感器, 可以抵抗大风对太阳能装置的影响<sup>[11]</sup>, 降低太阳能设备的损毁率, 大大提高的太阳能的稳定性与环境适应性, 具有广泛的应用前景。

## 1 主动式双轴跟踪器的设计

本系统硬件由单片机 STM32F103C8T6、GPS 模块、电机驱动器、步进电机、执行机构、风速传感器、电源模块、电池板姿态模块等构成, 系统结构如图 1 所示, 单片机通过 GPS 模块获取当地的经纬度和时间日期信息, 根据经纬度和时间解算太阳方位角和高度角, 将方位角和高度角转换成一定的脉冲信号发送给步进电机, 步进电机通过减速器调整太阳能跟踪装置的双轴姿态角, 使太阳能板对准太阳光, 在实际使用中存在种种原因导致太阳高度角和方位角失准的情况, 这里的太阳能电池板姿态模块可把太阳能板的高度角和方位角发送给太阳能控制器, 如存在偏差即可立即调整, 以确保太阳能板时刻跟踪太阳光; 风速传感器用来测量风速, 当风速大于一定的阈值时 ( $12 \text{ m/s}$ ), 单片机会进入中断响应程序, 控制步进电机让太阳能跟踪器与水平面平时, 直到风速小于阈值时 ( $12 \text{ m/s}$ ), 太阳能跟踪器继续主动追踪太阳角, 这里的风速的阈值设定可根据当地的实际情况做更改。

收稿日期: 2018-12-03; 修回日期: 2018-12-24。

基金项目: 宿迁市科技计划指导项目(Z2018093)。

作者简介: 葛海浪(1989-), 男, 江苏宿迁人, 研究生, 讲师, 主要从事传感器数据融合与导航方向的研究。

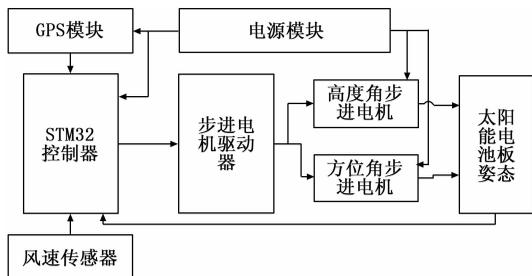


图 1 太阳能自动跟踪系统图

### 1.1 太阳能跟踪器结构

采用单个太阳能放置的方式, 太阳能跟踪器为两轴形式, 可以实现太阳能高度角和方位角的调整, 该跟踪器结构主要由基座、固定支架、太阳能电池板、步进电机、蜗轮蜗杆减速机和电动推杆组成, 如图 2 所示, 此外在太阳能电池板上安装有姿态传感器模块, 在支架上安装有风速传感器。

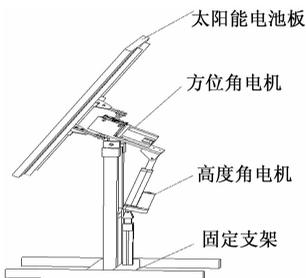


图 2 太阳能板结构

太阳能跟踪器的具体的工作原理为: 单片机根据 GPS 信息计算的太阳高度角和方位角, 计算出跟踪器所需要到达的角度, 推导出方位角步进电机和高度角步进电机需要的脉冲数, 单片机控制器发送脉冲给步进电机驱动器, 步进电机驱动器驱动步进电机转动, 经过减速器调整太阳能跟踪器转到相应的位置。为了确保太阳能电池板是正对着太阳入射角, 在太阳能电池板上安装有姿态模块, 时刻检测太阳能电池板的姿态角并反馈给太阳能控制器, 如有超过一定的误差范围, 则立即通过步进电机调整太阳能板姿态, 为了不让电机频繁启动, 这里的姿态角误差可设定为  $2^\circ$ ; 为了防止太阳能电池板收到强风的冲击损毁, 在太阳能设备上装有风速传感器, 将风速数值反馈给太阳能控制器, 在风速过大时调整太阳能电池板姿态, 减少太阳能电池板正对强风风向的投影面积。

### 1.2 转向机构设计

太阳能设备的精确转向是太阳能自动跟踪系统精度的关键部件, 本设计的太阳能跟踪器的转向系统是利用步进电机加蜗轮蜗杆减速器实现的。方位角的调节由步进电机驱动蜗轮蜗杆减速机完成转向, 步进电机的输出轴与蜗杆相连接, 蜗轮蜗杆减速机的蜗轮作为输出轴, 输出轴经过法兰太阳能电池板背面的连接板相连接; 蜗轮蜗杆减速机具有体积小、结构紧凑、减速比大等优点, 同时蜗轮蜗杆中蜗杆的导程角小于摩擦角时, 蜗杆传动可实现自锁, 使

太阳能电池板可以很稳定的固定在特定的方位角, 不会发生反向转动。方位角转向系统中采用的方位角步进电机选择型号为 J-5718HB5401, 2 相, 步距角  $1.8^\circ$ , 静力矩  $3.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ; 蜗轮蜗杆减速器选用型号为 NMRV030, 减速比为 1:50, 方位角的转向机构如图 3 所示。

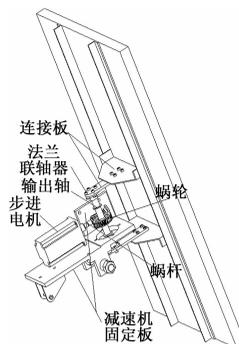


图 3 方位角转向机构

高度角的调节采用电动推杆实现, 电动推杆又叫直线驱动器, 电动机经齿轮减速后, 带动一对丝杆螺母。把电机的旋转运动变成直线运动, 利用电动机正反转完成推杆动作; 与液压杆和气缸相比, 电动推杆的伸缩长度控制更加精确, 操作简单, 可以实现远距离控制、集中控制, 电动推杆由驱动电机、减速齿轮、螺杆、螺母、导套、推杆、弹簧、外壳、微动控制开关等组成, 电动推杆内部结构如图 4 所示。

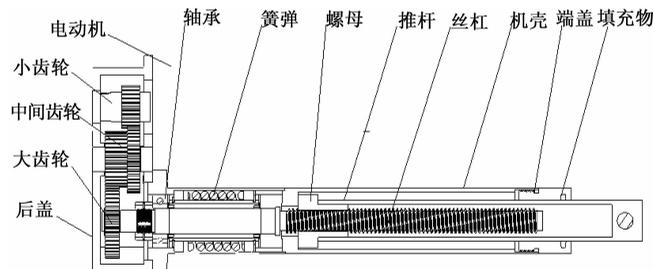


图 4 电动推杆结构图

电动推杆驱动电机为 42 型步进电机, 电动推杆推力为  $500 \text{ N}$ , 速度为  $24 \text{ mm/s}$ , 行程为  $100 \text{ mm}$ , 推杆全部收回时为全长为  $205 \text{ mm}$ , 全部伸出后全长为  $305 \text{ mm}$ , 电动推杆内部使用了丝杠螺母, 具有大减速比和自锁效应, 确保太阳能电池板可以稳定的固定在特定的高度角上。太阳能电池板的高度角 ( $\alpha$  角) 的调节是通过电动推杆的伸缩来改变的。如图 5 所示, 三角形的另外为  $310 \text{ mm}$  和  $106.5 \text{ mm}$ , 电动推杆长度的变化范围在  $205 \sim 305 \text{ mm}$  之间, 根据余弦定理可计算出高度角  $\alpha$ 。

$$\alpha = 87 - \arccos\left(\frac{107442.25 - L^2}{66030}\right) \quad (1)$$

式中,  $L$  为电动推杆长度, 这个长度是指电动推杆总长度。

则太阳能板高度角  $\alpha$  范围是  $[9.6^\circ, 79.2^\circ]$ , 太阳能板与水平面的夹角的取值范围为  $[10.8, 80.4]$ , 要想实现太阳能板正对太阳, 那么太阳能板与地面的夹角和太阳高度角互余即可, 及两角相加等于  $90^\circ$ ; 在太阳高度角为  $[0, 9.6]$  范围内变化时, 由于电动推杆的行程达到最大时, 长

度最多是 305 mm, 此时太阳能板与水平面的夹角最大能达到 80.4°, 故太阳高度角在 [0, 9.6] 范围内变化时, 太阳能板与地面夹角一直保持 80.4° 不变, 即太阳能控制器不做任何角度调整; 虽然太阳能电池板没有完全正对太阳入射角, 但此时太阳辐射能量比较小, 对太阳能设备能量转化率的影响几乎可以忽略不计。

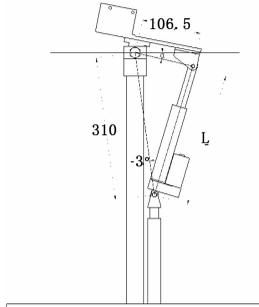


图 5 电动推杆机构图

### 1.3 视日运动轨迹跟踪原理

GPS 模块是本系统追踪视日轨迹的数据端。系统启动后, 控制器获取 GPS 模块提供的经度、纬度、海拔和 UTC 时间 (世界协调时间) 信息, 然后根据这些信息解算太阳高度角和方位角<sup>[12]</sup>, 高精度的太阳高度角和方位角的计算过程比较复杂, 需要的计算量大且计算时间长, 而本太阳能设备对太阳高度角和方位角的精度要求不是很高, 采用如下的计算方式即可满足太阳能自动跟踪系统的使用要求:

首先根据 GPS 提供的时间信息计算日角  $\theta$ :

$$\theta = \frac{2\pi(N - N_0)}{365.2422} \quad (2)$$

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422 \times (Y - 1985) - INT\left(\frac{Y - 1985}{4}\right) \quad (3)$$

式中,  $N$  为日数, 就是从每年 1 月 1 日开始计的天数;  $N_0$  为校正系数;  $Y$  为年份;  $INT$  为取整函数。

计算太阳赤纬角  $\phi$  则是以年为周期, 取值范围是  $-23.5^\circ \leq \phi \leq +23.5^\circ$ , 赤纬角  $\phi$  求解方式:

$$\begin{aligned} \phi = & 0.3723 + 23.2567 \sin\theta + 0.1149 \\ & \sin\theta - 0.1712 \sin 3\theta - 0.758 \cos\theta + \\ & 0.3656 \cos 2\theta + 0.0201 \cos 3\theta \end{aligned} \quad (4)$$

太阳能设备所在地区虽然都是采用北京时间, 但是所在地的经度和北京时间的标准经度大部分都不一致, 所以需要计算太阳能设备所在地区的时角  $\varphi$ :

$$\varphi = 15 \times \left( T_d + \frac{T_c}{60} - 12 \right) \quad (5)$$

$$T_d = h + \left[ \frac{m - (120 - J) \times 4}{60} \right] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_c = & 0.0028 - 1.9857 \sin\theta + 9.9059 \sin 2\theta \\ & - 7.0924 \cos\theta - 0.6882 \cos 2\theta \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $h$  为北京时间的小时;  $m$  为北京时间的分钟;  $T_d$  为地方时;  $T_c$  为时差;  $J$  为经度 (太阳能设备所处经度)。

太阳高度角  $H$  计算:

$$H = a \sin(\sin W \sin \phi + \cos W \cos \phi \cos \varphi) \quad (8)$$

式中,  $H$  为高度角;  $W$  为纬度;  $\phi$  为赤纬角;  $\varphi$  为时角; 根据太阳高度角  $H = 0$  可以计算出日出时间  $T_1$  和日落时间  $T_2$ , 则满足  $T_1 < T < T_2$  的时间  $T$  即为白天 (太阳能设备只在白天进行太阳跟踪)。

太阳方位角  $A$  计算:

$$A = \begin{cases} \arccos B \in [0, 180^\circ] & \varphi < 0; \\ 360^\circ - \arccos B \in [0, 180^\circ] & \varphi > 0; \end{cases} \quad (9)$$

$$B = \frac{\sin \phi - \sin H \sin W}{\cos H \cos W} \quad (10)$$

式中,  $A$  为方位角, 上午时角  $\varphi < 0$ , 正午时角  $\varphi = 0$ , 下午时角  $\varphi > 0$ 。

## 2 跟踪系统软件构成

基于 STM32F103C8T6 单片机搭建太阳能自动控制系统, 利用单片机读取 GPS 模块的经纬度信息和 GPS 的时间信息, 根据时间判断是否白天, 如果是晚上则继续读取 GPS 模块信息, 如果白天则根据视日轨迹跟踪原理解算出太阳高度角和方位角; 根据太阳的方位角和高度角信息, 驱动太阳能装置的方位角电机和高度角电机运动, 实现太阳能电池板对太阳的跟踪。太阳角是时刻变化的, 如果要对太阳角的实时跟踪, 需要频繁驱动电机, 对电机寿命和设备的稳定性不利, 故利用单片机计时, 每 5 分钟驱动设备对太阳跟踪一次, 这样使得太阳能设备的稳定性和电机的寿命得以提高, 降低电机的启动频率也有利于降低能量损耗, 间接地提高了太阳能发电的效率。为了确保太阳能电池板是正对着太阳入射角, 在太阳能电池板上安装有姿态模块, 时刻检测太阳能电池板的姿态角, 反馈给太阳能控制器, 如有超过一定的误差范围, 则立即通过步进电机调整太阳能板姿态, 为了不让电机频繁启动, 这里的姿态角误差可设定为 2°; 此外考虑到太阳能设备所处野外天气情况的复杂性, 主要是风速过大会造成太阳能板的损坏, 在太阳能设备上安装有风速传感器, 单片机读取风速传感器的风速信息, 当风速大于阈值 (12 m/s) 时启动防损坏中断程序, 单片机控制太阳能板“放平”, 由于高度角电机的推杆长度的影响, 这时的太阳能板的放平是指与水平面的夹角为 10.8°, 这个角度比较小, 完全可以实现实现太阳能设备的抗风特性。系统软件的总体流程如图 6 所示。

## 3 实验

根据视日运动轨迹跟踪原理, 在经度 118.3 纬度 33.93 (宿迁) 对 2018 年 6 月 6 日太阳高度角和方位角进行解算, 太阳高度角的变化范围是 0~78.7° 之间, 正午之前太阳高度角逐渐增大, 正午之后太阳高度角逐渐减小, 太阳高度角变化曲线如图 7 (a) 实线所示; 太阳方位角采用 360° 表示, 在正午时刻方位角为 180°, 白天 (即日出和日落时间之间) 太阳方位角的变化范围在 62.5°~297° 之间, 太阳方位角如图 7 (b) 曲线所示。

根据视日运动轨迹原理计算出的当前太阳高度角和方位角, 单片机发送相应的脉冲控制步进电机, 经过减速器控制转向系统实现高度角和方位角的调整, 利用姿态传感

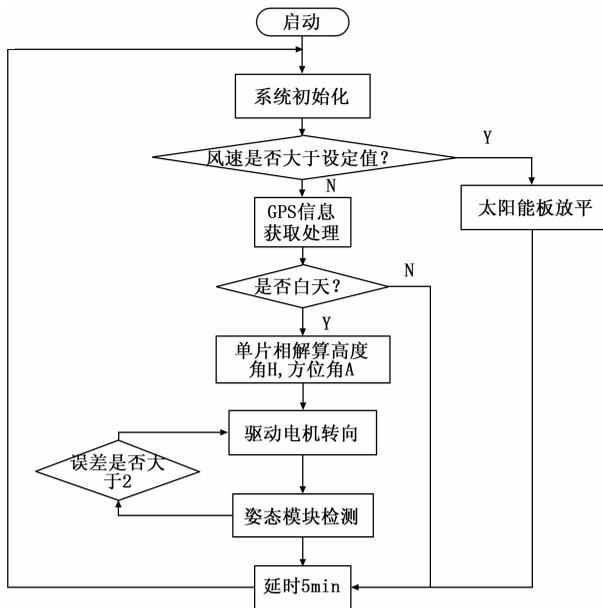


图 6 系统的流程图



图 8 计算与实测角度对比显示

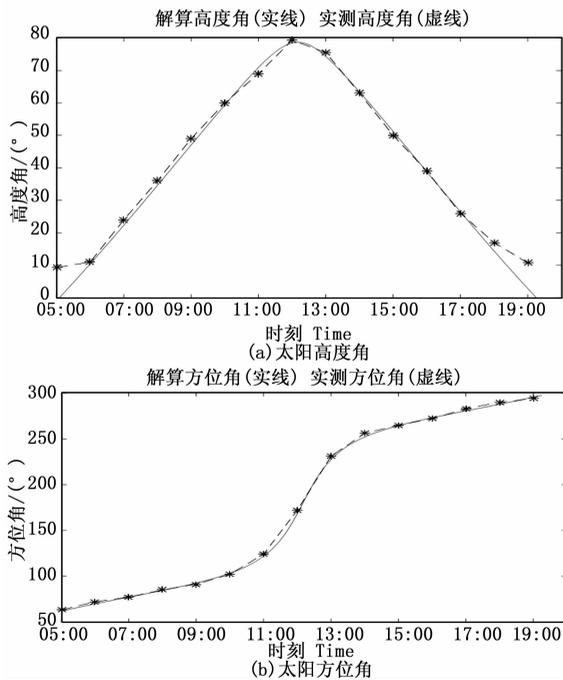


图 7 太阳高度角和方位角

器 (MPU6050) 对太阳能板的姿态角进行测量并反馈给单片机, 利用姿态传感器实测的太阳的高度角如图 7a 虚线 (星号) 所示, 实测的太阳方位角如图 7b 虚线 (星号) 所示; 显示模块显示任一时刻理论计算角度和姿态模块实测角度信息, 同时也显示 GPS 模块提供的位置信息和海拔信息, 如图 8 所示, 根据显示的计算角度和姿态角度进行分析, 可以进一步提高太阳能跟踪系统的精度。

#### 4 结论

本设计基于 STM32F103C8T6 单片机搭建太阳能自动

跟踪系统, 采用主动式双轴跟踪方式对太阳进行自动跟踪, 同时与姿态传感器构成闭环控制系统, 在太阳能装置出现较大偏差时可及时校正高度角和方位角, 具有精度高、适应性强、成本低等优点, 实验结果显示太阳跟踪器可有效跟踪太阳角, 精度可达到  $2^{\circ}$  左右, 电动推杆的工作范围有限导致跟踪器在日出和日落时不能有效跟踪太阳角, 但日出日落时太阳辐射很小, 故对于太阳能转化效率的影响很小。太阳能自动追踪系统安装有风速传感器, 可以根据风速调整太阳能电池板的姿态, 以降低大风对太阳能装置的载荷, 降低太阳能设备的损毁率, 大大提高的太阳能的稳定性与环境适应性, 具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 甘屹, 郭家忠, 王子健, 等. 基于遗传算法改进的太阳能跟踪控制 [J]. 控制工程, 2015, 22 (1): 157-163.
- [2] 张瑞雪, 高胜东, 韩振宇, 等. 槽式太阳能热发电跟踪控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (23): 89-91.
- [3] Al-soud M S, Abdallah E, Akayleh A, et al. A parabolic solar cooker with automatic two axes sun tracking system [J]. Applied Energy, 2010, 87 (2): 463-470.
- [4] 秦佳妮, 陈捷, 封杨. 太阳能发电跟踪装置远程测试系统的研究 [J]. 机械设计与制造, 2018 (1): 198-201.
- [5] 张翠云, 陈学永, 陈仕国, 等. 基于 PLC 的双轴太阳能跟踪控制系统设计 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2013, 41 (6): 1051-1055.
- [6] 许启明, 冯俊伟, 宫明. 太阳能利用跟踪技术的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (10): 6294-6297.
- [7] 王林军, 邵磊, 门静, 等. 太阳能自动跟踪系统的研究现状及展望 [J]. 中国农机化学报, 2014, 35 (1): 283-287.
- [8] 王金平, 王军, 张耀明, 等. 槽式太阳能聚光器跟踪系统运行特性分析 [J]. 太阳能学报, 2016, 37 (12): 3125-3131.
- [9] 王万乐, 宋健, 解云兴, 等. 高精度全天候太阳能自动跟踪系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2017 (7): 76-78+83.
- [10] 朱国栋, 王成龙, 马军, 等. 一种高精度太阳跟踪控制装置研究 [J]. 传感技术学报, 2018, 31 (6): 830-835.
- [11] 李正农, 吴卫祥, 梁笑寒, 等. 基于实测的塔式太阳能定日镜动力特性分析 [J]. 太阳能学报, 2014, 35 (11): 2133-2138.
- [12] Stine W B, Harrigan R W. Solar energy fundamentals and design [M]. John Wiley & Sons Inc, USA, 1985: 110-111.