

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107050

嵌入式太阳跟踪定位控制系统设计与研究

胡寅 梅月兰

(昆明理工大学 城市学院 昆明 650093)

摘要: 太阳能设备应用中对太阳运动位置的跟踪和定位,决定了太阳能的利用率。为了能够最大限度的获得太阳能,设计并实现了精确跟踪太阳实时运动位置的跟踪定位控制系统。本系统设计方法是依托太阳位置算法,通过采集时间、空间信息计算后获得当前太阳高度角和方位角。将角度信息送入嵌入式控制器驱动两轴伺服电机进行运动控制,实现太阳位置的实时跟踪定位。通过将理论计算值与光强度传感器采集光斑最大强度数据对比,验证嵌入式太阳跟踪定位控制系统的准确性。通过太阳位置算法理论值与系统实测值对比表明,高度角误差 $\pm 1^\circ$ 、方位角误差 $\pm 3^\circ$,满足实时跟踪太阳运动位置的精度要求。

关键词: 太阳跟踪;太阳位置算法;嵌入式系统;高度角;方位角;对比分析

中图分类号: TK513.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design and research of embedded solar tracking and positioning control system

Hu Yin Mei Yuelan

(City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The solar energy utilization rate is determined by the tracking and positioning of solar motion in the application of solar equipment. In order to maximize the solar energy, a tracking and positioning control system is designed and implemented to accurately track the real time motion position of the sun. This system design method is based on the solar position algorithm, the current solar altitude angle and azimuth angle are obtained through time and space information calculation. The angle information is fed into the embedded controller to drive two-axis servo motor for motion, realizing the real-time tracking and positioning of the sun. The accuracy of the embedded solar tracking and positioning control system is verified by comparing the theoretical calculation value with the maximum intensity data collected by the light intensity sensor. The comparison between the theoretical value of the solar position algorithm and the measured value of the system shows that the altitude angle error $\pm 1^\circ$ and azimuth error $\pm 3^\circ$. The result meet the accuracy requirement of tracking the position of solar movement in real time.

Keywords: solar tracking; solar position algorithm; embedded system; altitude angle; azimuth angle; contrastive analysis

0 引言

在社会经济高速发展的今天,对于能源的消耗日益严重。这就使新能源的开发和利用迫在眉睫。新能源领域中的太阳能技术有着巨大的优势和前景。太阳能具有能源储量趋近于无限、适用范围普遍存在、清洁环保无污染以及使用成本经济等特点^[1]。目前可行的利用方式主要通过太阳能电池、斯特林发电机等太阳能转换设备实现。太阳能有诸多的优点,但是也存在劣势,究其原因主要是相对于地球而言,太阳的位置每时每刻都在发生变化。太阳能的能量分布存在地域差异,而且能量的获得是随机的、间接的和

不均匀的^[2]。

针对太阳能的上述特点,目前已经发展了一系列利用太阳能的设备。要提高太阳能设备的转换效率需要能量转换装置必须随时与太阳光保持垂直,这样才能够在有限的受光面积上获得最大限度的太阳能。太阳能设备对太阳运动位置的跟踪定位与否,决定了其能量的利用率。文献[3]研究表明了太阳光照角度与太阳能接收率相关,太阳跟踪定位系统对于太阳能的利用率相较于非跟踪系统而言提高了37.7%。对于太阳能技术而言,跟踪定位技术的发展显得尤为重要。

近年来,太阳跟踪定位技术发展有两大趋势,一种是使

用光学传感器进行太阳跟踪定位,主要涵盖时间控制式、程序控制式和光电跟踪式等^[4]。上述的跟踪定位装置原理简单,结构简洁,易于实现。余佳焕等^[5]提出了基于全站仪采集目标棱镜三维坐标并进行两轴线相对位置转换方法。但是对于有随机遮挡的太阳光线,光学类传感器会存在跟踪盲区,无法持续不间断地跟踪定位太阳实时运行的位置。光学传感器也存在累计误差和传感器老化等问题。另一种跟踪定位装置不采用光学传感器,而是利用天文学中对太阳运行轨迹进行观测和跟踪的算法来实现的。李紫倩等^[6]提出了利用经纬度和时间计算高度角和方位角的方式进行太阳跟踪调节,该类装置原理复杂,高度集成化,无外置传感器,需要通过大量计算获得当前太阳的实时位置,可以持续不间断地跟踪定位太阳实时运行的位置。本文开展了基于太阳位置算法的嵌入式太阳跟踪定位控制系统设计与研究,通过搭建嵌入式太阳跟踪定位平台,对理论计算数据和实验实测数据进行对比后,验证了太阳位置算法的精确性,为后续研究无外置传感器太阳位置精确跟踪系统奠定基础。

1 基于太阳位置算法的实验框架搭建

1.1 太阳跟踪定位平台搭建

为了实现对太阳实时位置的精确跟踪定位,如图 1 所示。机械结构方面跟踪定位机架整体采用不锈钢材焊接而成。为了保证机架运行的稳定性和平滑性,减小振动对机架的影响,两自由度旋转轴上均安装了轴承。定位机架上安装旋转和俯仰两个自由度的伺服电机和减速器。在旋转机构轴向的位置安装绝对编码器,用于精确检测跟踪机架实时运动的高度角和方位角。在机架上安装了聚光器,其目的是为后续架设斯特林发电机做准备工作。为了验证跟踪定位的实际效果,在聚光器同侧靠上的位置顶端安装有 8 个硅光电池传感器,该类传感器主要用于检测在聚光器平面上的太阳光线强度。上述设计的主要目的是能够获得当前位置下太阳光照强度的情况。目的是为了后续能够自动记录和验证太阳定位算法实时控制效率以及实际与太阳运行位置的偏差。通过上述数据不断优化算法设计,从而实现基于太阳位置算法的跟踪定位精确控制^[7]。



图 1 太阳跟踪定位平台结构

1.2 嵌入式控制系统构建

嵌入式系统的构建主要涉及嵌入式控制器、前向通道和后向通道 3 个部分,如图 2 所示。

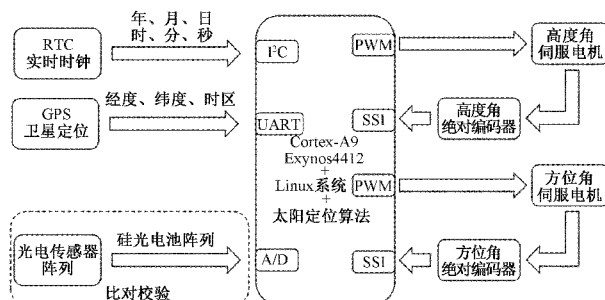


图 2 嵌入式太阳跟踪定位系统结构

嵌入式控制器的主控 CPU 是四核 Cortex-A9 的 Exynos4412 处理器。嵌入式控制器移植 Linux 操作系统。在上述软硬件平台上通过实现太阳定位算法,驱动俯仰和方位两轴伺服电机运动,实现太阳位置的自动跟踪定位。

前向通道主要负责采集太阳自动跟踪定位所需的各项数据信息,主要涉及时间、地理位置和光照强度 3 类数据形式。

1) RTC 实时时钟数据

太阳定位算法需要当前实时的时间信息作为算法输入参数。利用 RTC 实时时钟电路可以获得当前的实时时间信息。该电路与嵌入式控制器采用 I²C 协议进行通信。内容涉及有年、月、日、时、分、秒等 6 项数据。

2) GPS 卫星定位数据

太阳定位算法还需要结合当前地理位置信息来计算太阳当前所处的方位和高度,所以 GPS 卫星定位数据也是算法输入的重要参数。利用 GPS 卫星定位电路可以获得当前地理位置的经纬度等信息。GPS 电路采用异步串行通信协议方式向嵌入式控制器传送当前地理位置经度、纬度和时区等 3 项数据。

3) 硅光电池光照强度数据

采用硅光电池作为太阳光光照强度检测的传感器,主要是考虑通过硅光电池输出电压的分布情况来检验太阳定位算法输出控制的准确性和实时性。硅光电池的光照强度电压通过 A/D 转换电路转变为数字信号后送入嵌入式控制器中,嵌入式控制器将上述数据进行计算后得到光强度偏离中心的程度,将该数据自动记录下来,为后续的太阳定位算法的修正提供依据。

后向通道主要实现俯仰和方位两轴伺服电机的运动控制。两轴伺服电机采用 PWM 信号进行速度控制,两轴的运动过程均通过 12 位绝对式编码器进行检测。绝对式编码器通过 SSI 接口与嵌入式控制器进行通信,实现位置闭环。从而可以精确的控制伺服电机按照太阳位置算法的结果进行跟踪定位^[8-9]。

2 太阳位置算法理论

太阳位置算法的核心是要得到精确的太阳实时位置,而太阳实时位置是通过太阳高度角和太阳方位角来表达的。如图 3 所示,太阳高度角是指太阳入射光线与太阳入射光线所在地平面的夹角,用 α 表示。而太阳方位角是指从北极点开始顺时针方向到太阳入射光线在地平面上投影的夹角,用 ψ 表示。

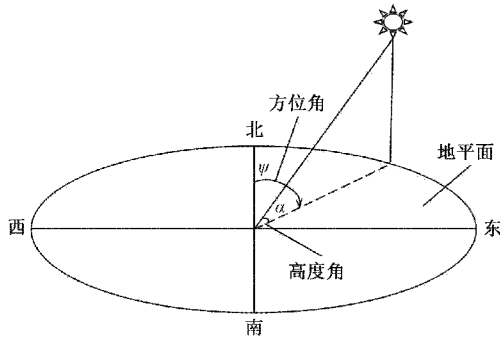


图 3 太阳实时位置示意图

在太阳位置算法中要获得精确的太阳高度角和方位角数据,就需要将时间和空间信息作为太阳位置算法的输入参数。通过一系列的数值计算,可以获得对应时间和空间下的实际的太阳高度角和方位角。

在时间维度上将当前的日期和时间按照:年、月、日、时、分和秒 6 个参数进行划分。在空间维度上将当前的地理位置按照:经度、纬度和时区 3 个参数进行划分。通过上述 9 个参数送入太阳位置算法进行计算,就可以求解出当前太阳所在空间、时间的实时高度角和方位角^[10-14]。太阳位置算法的计算流程如图 4 所示。

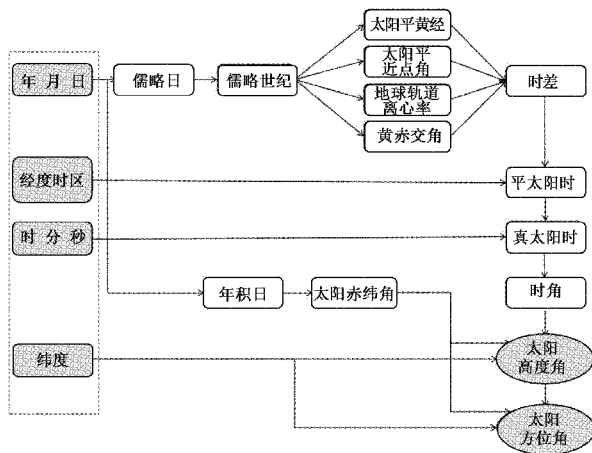


图 4 太阳位置算法计算流程

首先利用当前 RTC 数据中的年 Y 、月 M 、日 D 参数进行计算获得年积日 n 和太阳赤纬角 δ , 计算公式如式(1)、(2)所示。

$$n = \left(\frac{275M}{9}\right) - \left(\frac{M+9}{12}\right) \left(\frac{Y-4\left(\frac{Y}{4}\right)+2}{3} + 1\right) + D - 30 \quad (1)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (2)$$

利用上述数据还可以求得儒略日 J_D 和儒略世纪 J_C , 计算公式如式(3)、(4)所示。

$$J_D = 365.25(Y+4716) + (30.6001(M+1)) + D + \left(2 - Y/100 + \left(\frac{Y/100}{4}\right)\right) - 1524.5 \quad (3)$$

$$J_C = \frac{J_D - 2451545}{36525} \quad (4)$$

接下来由儒略世纪 J_C 可以同步求得太阳平黄经 L_0 、太阳平近点角 θ_M 、地球轨道离心率 e 和黄赤交角 ϵ 4 个参数,计算公式如式(5)~(8)所示。

$$L_0 = 280.46645 + 36000.76983(J_C) + 0.0003032(J_C)^2 \quad (5)$$

$$\theta_M = 357.52910 + 35999.05030(J_C) - 0.0001559(J_C)^2 \quad (6)$$

$$e = 0.016708617 - 0.000042037(J_C) - 0.0000001256(J_C)^2 \quad (7)$$

$$\epsilon = 23 + \frac{\left(26 + \frac{21.448 - 46.815(J_C) - 0.00059(J_C)^2}{60}\right)}{60} \quad (8)$$

对上述 4 个参数进行如式(9)所示计算,可以获得当前的时差 E_Q :

$$E_Q = \tan^2\left(\frac{\epsilon}{2}\right) \sin(2L_0) - 2e \sin(\theta_M) + 4e \tan^2\left(\frac{\epsilon}{2}\right) \sin(\theta_M) \cos(2L_0) - \left(\frac{\tan^4\left(\frac{\epsilon}{2}\right)}{2}\right) \sin(4\theta_M) - \frac{5e^2}{4} \sin(2\theta_M) \quad (9)$$

得到时差 E_Q 后,引入经度 ξ 和时区 Z 参数可以求得平太阳时 T_F , 计算公式如式(10)所示。

$$T_F = E_Q - 4\xi + 60Z \quad (10)$$

然后在平太阳时的基础上,再引入时 H 、分 M_i 、秒 S 参数进行计算,可以得到真太阳时 T_S 和时角 ω , 计算公式如式(11)、(12)所示。

$$T_S = \left(60H + M_i + \frac{S}{60}\right) + T_F \quad (11)$$

$$\omega = \left(\frac{T_S}{4} - 180\right) \quad (12)$$

最终通过时角 ω 、太阳赤纬角 δ 和纬度 φ 可以求出太阳高度角 α 以及太阳方位角 ψ , 计算公式如式(13)、(14)所示。

$$\alpha = \arcsin(\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega)) \quad (13)$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{\sin(\alpha)\sin(\phi) - \sin(\delta)}{\cos(\alpha)\cos(\phi)}\right) \quad (14)$$

至此,通过太阳位置算法就完成了从当前时间维度和空间维度实现太阳高度角和方位角的计算转化过程^[15-17]。

3 实验分析对比

基于上述的机械物理架构和太阳定位算法,为了验证太阳定位算法的跟踪精度和效率,进行了相应的实验设计,如图 5 所示。

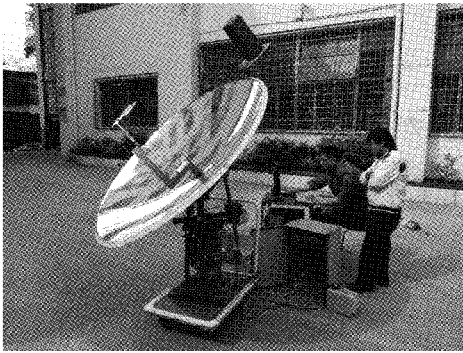


图 5 太阳位置跟踪实验场景

3.1 高度角跟踪实验

选择光照时间充足,少云的时间进行实验,将设备置于开阔场地,本次实验时间是从 7:00~19:00,嵌入式控制器根据太阳定位算法利用时间、地理等参数进行计算后驱动俯仰伺服电机进行控制。绝对值编码器将实时测量到的俯仰角度送至嵌入式控制器中进行记录。同时硅光电池传感器记录当前太阳光照强度的分布情况。将时间、俯仰角度和光照强度 3 类数据综合分析后对太阳定位算法权值进行修正得到太阳高度角,使其更加贴合实际太阳高度位置运行情况^[18-19]。如图 6 所示为在昆明太阳高度角随着时间推移带来的变化情况。虚线是通过计算太阳影子的方式来间接测量太阳高度角,实线是通过绝对值编码器测量的太阳高度角度值。两者从整体上来看,误差范围控制在 $\pm 1^\circ$ 以内。

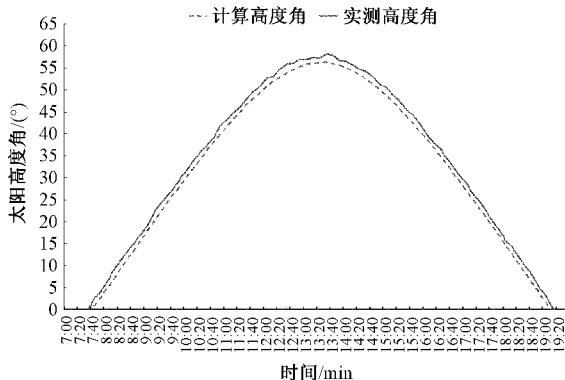


图 6 高度角跟踪对比实验数据

3.2 方位角跟踪实验

同样,对方位角也采用了相似的方式进行,如图 7 所示。虚线是通过计算太阳影子的方式来间接测量太阳方位角,实线是通过绝对值编码器测量的太阳方位角度值。两者从整体上来看,误差范围控制在 $\pm 3^\circ$ 以内。

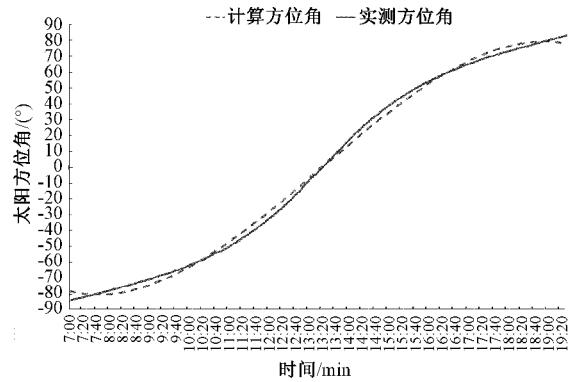


图 7 方位角跟踪对比实验数据

从实验误差分析可以看出太阳高度和方位的实际测量值和太阳位置理论计算值之间的平均误差较小,可以满足实际太阳位置的跟踪控制需求。

4 结 论

本文提出了基于太阳位置算法的嵌入式太阳跟踪定位控制系统设计,开展了相关的实验研究探索。从跟踪定位系统运行的精度来看,该跟踪定位系统完全不用考虑外界因素对整体系统的影响,整个系统按照嵌入式系统内的太阳位置算法实现实时精确地跟踪定位。达到预期设计目的。本文的先进性在于没有外置光学传感器将使整个跟踪定位系统的造价成本大幅下降,系统的稳定性可靠性提升。未来针对集群式的太阳能发电应用场景,可对太阳能发电装置的远程集群控制展开研究,有助于太阳能设备发电效率的提升和太阳能装置的推广及应用。

参考文献

- [1] 王鼎,时雨,胡婧婷,等. 太阳能热发电技术综述及其在我国适用性分析[J]. 电网与清洁能源,2016,32(9): 151-156.
- [2] 余杨,包海波,王培. 太阳能技术 R&D 战略研究:战略布局与创新成效[J]. 科技管理研究,2015,35(11): 33-38.
- [3] 曹传钊,郑建涛,刘明义,等. 塔式太阳能热发电技术的发展[J]. 可再生能源,2013,31(12):21-25.
- [4] 赵卫东. 基于 MCU 的高精度太阳位置传感器[J]. 传感器与微系统,2020,39(3):6-9.
- [5] 余佳焕,彭佑多,颜健,等. 一种基于全站仪的大型碟式太阳能双轴跟踪装置轴线测量方法[J]. 太阳能学报,2018,39(2):461-467.
- [6] 李紫倩,梁飞,孙荣霞,等. 太阳能电池按经纬和时间自

- 跟踪控制器设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4): 6-10.
- [7] 刘路路, 黄祥康, 邱选兵, 等. 基于 ARM 的太阳跟踪控制系统设计[J]. 电子科技, 2013, 26(6): 10-13.
- [8] 张秋艳, 高平安, 杨月, 等. 基于 MSP430 的太阳能电池数据采集器设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(8): 145-149.
- [9] 丁浩楠, 李晓. 碟式太阳能光热发电跟踪控制系统的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 202-209.
- [10] ABDELGHANI-IDRISSI M A, KHALFALLAOUI S, SEGUIN D, et al. Solar tracker for enhancement of the thermal efficiency of solar water heating system [J]. Renewable Energy, 2018, 119: 79-94.
- [11] WANG Q J, YAN L, YUAN Q Q, et al. An automatic shadow detection method for VHR remote sensing orthoimagery [J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 469.
- [12] AHMED Z, ZEESHAN S, FLEISCHMANN P, et al. Ant-App-DB: A smart solution for monitoring arthropods activities, experimental data management and solar calculations without GPS in behavioral field studies[J]. F1000Research, 2015, 3: 311.
- [13] LOON C M, DAUD M Z. Sensorless dual axis solar tracker using improved sun position algorithm [J]. International Journal of Power Electronics and Drive Systems(IJPEDS), 2020, 11(3): 1305-1312.
- [14] PATTANASETHANON S. The solar tracking system by using digital solar position sensor [J]. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 3(4): 678-682.
- [15] 国志磊, 安雪滢, 罗宗富, 等. 轨道动力学方法用于太阳位置精确解算的比较研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 188-195.
- [16] 王奔, 牛洪海, 徐卫峰, 等. 基于 PLC 的槽式光热太阳能跟踪控制系统的应用[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 185-194.
- [17] 曾利霞. 基于视日运动轨迹的双轴太阳跟踪系统的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2012.
- [18] 李晓兵. 太阳位置偏差检测器的设计[D]. 太原: 太原科技大学, 2015.
- [19] 张康龙. 高精度太阳位置跟踪关键技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.

作者简介

胡寅, 工学硕士, 实验师, 主要研究方向为机电检测控制技术。

E-mail: hu_yin08@126.com

梅月兰(通信作者), 理学硕士, 讲师, 主要研究方向为泛函分析、数学建模等。

E-mail: 416641825@qq.com