

基于 STM32 的光伏发电板二自由度自跟随系统设计

吴琼¹ 王楠¹ 瞿超杰² 石科帅¹ 孙伟卿¹

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 上海电器科学研究所 上海 200063)

摘要: 针对传统光伏发电系统中太阳能利用率低的问题, 采用以 ARM Cortex-M3 为内核的 STM32F103 作为系统的主控芯片, 并以 GPS 和四象限光电传感器作为太阳跟踪装置, 设计了一种新的太阳能自跟随系统。首先利用视日运动轨迹法进行初步跟踪, 然后将光电传感器采集到的信号经过调理电路处理后送给 MCU 控制器, 使其产生 PWM 波来精确控制对应的双轴步进电机在水平和俯仰方向分别进行调整, 从而实现光伏发电板对太阳的全自动跟踪。实验结果表明, 该系统具有跟踪精度高, 运行稳定和成本低廉等优点。

关键词: 太阳跟踪; 光电传感器; 步进电机; STM32 芯片; 调理电路; 控制器

中图分类号: TN830; TM615 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Design of automatic two DOF photovoltaic array system based on STM32

Wu Qiong¹ Wang Nan¹ Qu Chaojie² Shi Keshuai¹ Sun Weiqing¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: Aiming at a problem of low availability of traditional photovoltaic system, taking STM32F103 whose core is Cortex-M3 as the system's main chip, and taking GPS as well as 4-quadrant photoelectric sensor as the solar tracing device, and designed a new solar automatic tracing system. Firstly, take use of sun movement method to track roughly, then send the signal of photoelectric sensor to micro control unit after dealt with by adjust circuit, the MCU generate PWM waves to control biaxial stepper motor to adjust in the horizontal and vertical separately, so that the photovoltaic array could track the sun automatically. The experimental results show that, the control system has high tracing accuracy and operate stably and cost a litter, etc.

Keywords: sun tracing; photoelectric sensor; stepper motor; STM32 chip; adjust circuit; controller

0 引言

当前世界经济快速发展, 伴随的能源危机和环境污染问题日益加重。太阳能作为一种可再生清洁能源, 取之不尽用之不竭, 具有广阔的发展前景。目前在光伏发电应用领域, 光伏发电板普遍采取固定角度式的安装方法, 此种方法具有简单易操作和结构稳定的优点。但由于太阳在永不停歇的运动, 且运动轨迹在春夏秋冬各有不同, 造成太阳光线与光伏发电板之间不是垂直照射而是存在一定的偏角, 即余弦效应, 使得太阳能利用率低, 其光伏发电系统的效率也随之而降低, 该固定角度式安装光伏发电板的弊病充分暴露^[1]。

为解决上述问题, 高效地利用太阳能资源, 常见的改进方法有两种, 分别是时间跟踪法和光感跟踪法。时间跟踪即利用 GPS 定位, 获取当地经纬度和时间, 代入到预先设定好的程序中调节光伏发电板的角度的, 由于该控制方法

属于开环控制, 因此会导致长时间累积误差, 使得光伏发电板出现偏离太阳的情况^[2]。光感跟踪法虽然测量较为精确, 但相应的测量范围比较有限, 当出现突发状况时容易陷入跟丢目标的窘境, 不利于系统的高效运行。本文综合考虑两种方法的优缺点, 提出一种混合跟踪方法, 第 1 步按视日运动轨迹采取程序跟踪控制, 第 2 步采用光电传感器进行校正跟踪控制。当太阳的位置在空中不断变化时, 光伏发电板在该控制系统下能够跟随太阳在水平和俯仰两个自由度调节, 始终保持光伏发电板与太阳光线呈垂直状态。理论研究表明, 该控制方法较传统控制方法其发电效率能够提高 36.5%^[3], 具有一定的工程应用价值。

1 光伏跟踪原理分析

按照不同的分类方法, 光伏跟踪可分为程序跟踪和传感器跟踪, 前文已简要介绍, 这里不再赘述。光伏跟踪还可

以分为单轴跟踪和双轴跟踪,单轴跟踪只在方位角上和太阳保持同步,高度角则只作季节性调整。双轴跟踪则同时兼顾方位角和高度角两个方向来跟踪太阳,显然双轴跟踪的效果要明显优于单轴跟踪,双轴跟踪装置如图 1 所示。

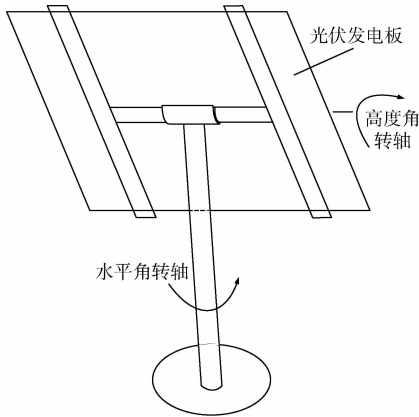


图 1 光伏发电板双轴跟踪装置

1.1 视日运动轨迹跟踪

视日运动轨迹跟踪方式是利用软件来求得系统所在地的地理位置和此时太阳的高度角 α 以及太阳的方位角 γ ,再利用硬件来对太阳的实时位置进行跟踪^[4]。

依据天体的概念来计算太阳的运行轨迹,在天体几何学中,太阳光线与地平面的夹角称为太阳的高度角 α ;太阳光线在地平面的投影与南北方向之间的夹角称为太阳的方位角 γ 。由数学三角函数知识可知:

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \quad (1)$$

$$\cos\gamma = (\sin\alpha\sin\varphi - \sin\delta)/(\cos\alpha\cos\varphi) \quad (2)$$

式(1)和(2)中, ϕ 为当地的地理纬度,可由全球定位系统(GPS)直接获得; δ 为太阳赤纬角,即太阳光线与地球赤道面的夹角,一年中的每一天太阳的赤纬角都在变化,由库伯(Cooper)公式^[5]可得一年中的第 n 天太阳赤纬角 δ 如式(3)所示; ω 为太阳时角,正午时分时角 $\omega=0$,由于 24 h 刚好运行一圈 360° ,所以每小时的时角为 15° ,上午为正值,下午为负值,如式(4)所示,时间 t 为一天中的时刻,其取值范围为 $0\sim 24$ h。

$$\delta = 23.45\sin\left(360\frac{284+n}{365}\right) \quad (3)$$

$$\omega = \begin{cases} 15(12-t), & t < 12 \\ 0, & t = 12 \\ -15(t-12), & t > 12 \end{cases} \quad (4)$$

由以上分析可知,只需要知道当地的具体时间和地理纬度,代入各式即可求得任何时间、任何地点的太阳具体位置。将实时的太阳高度角和方位角信息送给 MCU 处理后,经放大电路驱动双轴步进电机做出相应动作,调整光伏发电板实时跟踪太阳,获得最大光能。

1.2 光电传感器跟踪

光电传感器采用 6 块完全相同的硅光电池组成四象限

传感装置,是本控制系统的关键部件,硅光电池是一种能够将直接将光能转化为电能的半导体器件。该装置中 4 块硅光电池分别对应 4 个象限,另外 2 块用于检测光照的强弱,当光照低于一定阈值时,系统判断此时的天气为阴天,当即关闭控制系统,避免不必要的能量损耗。当太阳光垂直照射四象限传感装置时,输出电压一致,电机不动作;当光线与装置有一定偏角时,会驱动电机运行,工作原理如图 2 所示。

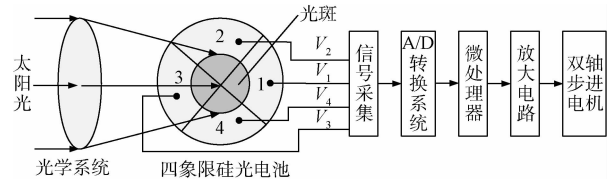


图 2 四象限传感装置工作原理

图 2 是太阳光线与光学系统完全垂直时,在硅光电池上形成一个圆形光斑,且处于硅光电池的正中心位置,4 个象限接收到相同大小的光能量,输出相同的电压信号^[6]。当光线呈一定夹角通过光学系统时,所形成的光斑会偏离中心位置,由于各象限的光能量与各象限的光斑面积成正比,因位置偏离导致的各象限光斑覆盖面积不同,所以输出的电压也不同。 V_x 表示 x 轴的电压差值, V_y 表示 y 轴的电压差值,当 $V_1 - V_3 > 0$ 时,即 $V_x > 0$,说明 1 区电压大,光斑偏向与 1 区,该信号经过 STM32 处理后发出对应 PWM 波控制步进电机在水平方向进行补偿,直至 V_x 的值为 0。同理,当 $V_y \neq 0$ 时,步进电机根据反馈也会做出在俯仰方向相应的调整,直至 $V_y = 0$,此时光伏发电板与太阳光是垂直的,可获得最佳的光能利用效率^[7]。

2 光伏自跟随系统设计

光伏发电板自跟随系统的总体结构如图 3 所示,主要由光电传感器、GPS 定位模块、风速传感器模块、STM32 处理器和双轴步进电机等构成。GPS 用来接收经纬度和 UTC 时间信息,计算出太阳高度角和太阳方位角,根据太阳位置信息驱动双轴电机初步跟踪太阳;风速传感器模块检测到大风等灾害天气时,把信号送给 STM32 处理器,控制光伏发电板水平放置,以保护发电装置;光线通过平凸透镜在硅光电池板上形成光斑,对应的四象限输出的弱信号需经过信号调理电路;STM32 采集调理电路输出的电压信号,计算光斑偏离中心的几何距离,从而调整光伏板的水平角和俯仰角,直至与太阳光保持垂直。当检测到日落时,系统回到基准位置,进入休眠状态^[8]。

2.1 硬件设计

2.1.1 微控制器 STM32F103

STM32F103 系列芯片是意法半导体(ST)公司开发的中低端 32 位微控制器,配置了丰富的外设功能模块,具有较高的性价比。该系列控制器使用了灵活的电源控制策

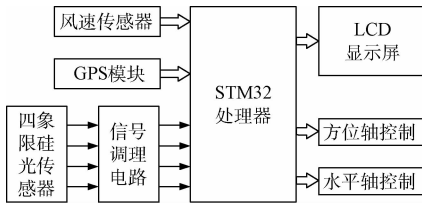


图 3 光伏自跟随系统总体结构

略,有效降低了内部功耗,可为芯片内部的各个模块提供标准工作电压。其使用 Cortex-M3 内核,时钟频率 72 MHz,在正常工作时消耗电流为 36 mA,在待机时刻则下降到 2 μ A,具有低功耗的优点;各模块的时钟频率可直接软件配置,且具备 2 个多通道 12 位 A/D 转换器来接收四象限硅光电池的 4 路模拟信号,转换时间只需 12.5 个时钟周期;内嵌 4 个定时控制器,能够工作在编码模式以及 PWM 模式,可以很方便地的制步进电机^[9]。

2.1.2 风速传感器

采用 GFW15 型感应式风速传感器,风速探头选用稳定性较好的超声波元器件,灵敏度高,稳定性好。当风力达到一定的强度时,控制器发出指令给步进电机调节光伏发电板的高度角为 0,即呈现水平状态,使发电板受到的风力最小,以保护跟踪装置的组件不被大风破坏;大风过后,则迅速恢复自动跟踪。

2.1.3 步进电机及驱动

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制电机,当电机非超载时,其转速和停止的位置仅仅取决于接收到脉冲信号的频率和个数,而不会收到负载变化的影响^[10]。当步进电机接收到一个脉冲信号时,电机的转轴就会向预定方向旋转一个固定角度,并且具有自锁功能,可以很好的满足光伏发电板自跟随发电系统驱动电机的选型要求。在实际使用中,选用性能较好的 Y80M2-2 型步进电机,其自带减速系统,电机的主要参数:额定工作电压 220 V,频率 50 Hz,功率 1.1 kW,转速 2 825 r/min,步距角 1.8°,功率因数 0.85。

2.1.4 电压比较器

光电传感装置使用四象限硅光电池板来检测太阳在不同位置时的光强值,在设计硬件电路时,集成运放电路选取较为常见的 LM324,包含 14 个引脚,具有真正的差分输入,其内部的 4 组运算放大器是完全相同且互不干扰的,每个放大器都包含 2 个输入和 1 个输出,LM324 光强采集电路如图 4 所示。

2.1.5 GPS 定位模块

跟踪系统的第 1 步视日轨迹跟踪法采用 GPS 接收太阳的经纬度和 UTC 时间信息,从而计算当地的日出、日落时间以及太阳的位置信息^[11]。GPS 模块选用 U-Blox LEA-6S 系列,该模块不受所选用的卫星定位系统的限制(可选中国的北斗定位系统),功耗低且灵敏度高,定位精度

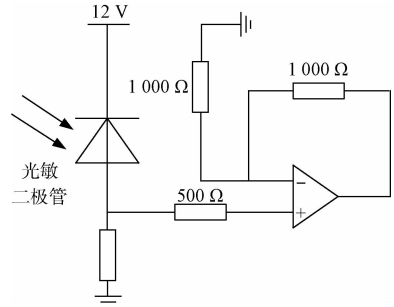


图 4 LM324 光强采集电路

可以达到 2.5 m,其输出端口可配置成 UART 接口,方便和 STM32 处理器连接。

2.2 软件设计

2.2.1 软件流程设计

首先需要完成的是系统初始化,包括实时时钟初始化和 PWM 输出初始化,此外还包括设置中断优先级,设置 GPIO 端口等操作。CUP 解码从 GPS 模块接收到的数据,获得纬度和时间信息,经过内部计算后得到太阳此时的高度角和方位角,并驱动双轴电机对太阳进行初步跟踪。上述方法会不可避免地产生偏差,导致太阳光并未与光伏发电板垂直^[12]。因此还需要第 2 步精确跟踪,即利用光电传感器的闭环控制,接收到 X 轴和 Y 轴电压的反馈量,不断的修正发电板的方位和倾角,直至硅光电池板上的光斑处于正中心位置。日落时,跟踪系统回归初始位置进入休眠状态,具体的系统软件流程如图 5 所示。

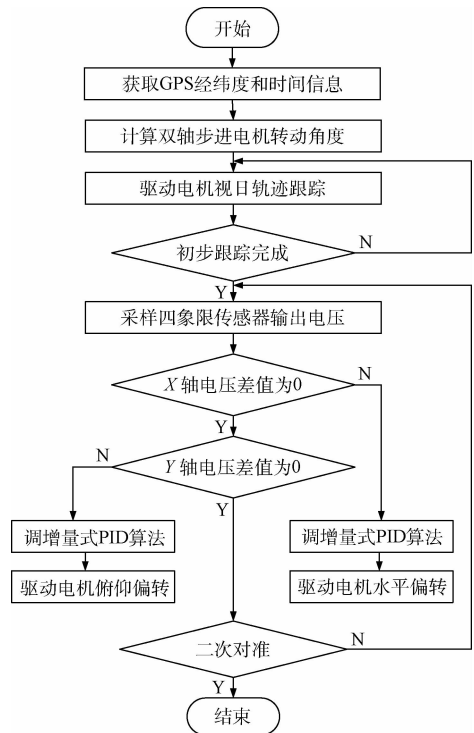


图 5 系统总体流程

2.2.2 太阳轨道计算程序设计

用视日运动轨迹法计算太阳轨道的程序使用 C++ 编写,主要依据式(1)和式(2)的原理进行程序设计。以下分别是太阳高度角和太阳方位角的计算子函数,在计算过程中为提高计算精度,故所有数据均定义为双精度类型^[13]。

```
//Solar altitude(太阳高度角)
doubleSolar_altitude(double lat, double dec, double
hour_angle)
{double var_angle;
double xx;
lat=lat * PI/180//转化为弧度
xx=sin(lat) * sin(dec) + cos(lat) * cos(dec) * cos
(hour_angle);
ver_angle=asin(xx);//单位:弧度
return(ver_angle);}
//Solar azimuth(太阳方位角)
double Solar_azimuth(double ver_angle, double dec,
double lat, double hour_angle)//变量分别表示高度角,赤
纬角,纬度,太阳时角
{doubleazi_angle;
double xx,yy;
xx=cos(dec) * sin(hour_angle)/(cos(ver_angle) *
cos(lat));
yy=(sin(ver_angle) * sin(lat)-sin(dec))/(cos(ver_
angle) * cos(lat));
if(fabs(xx)≤1)//绝对值小于等于 1
azi_angle=asin(xx);
else
azi_angle=asin(yy);
return(azi_angle);}
由上述程序可知,当输入当地纬度、赤纬角和太阳时
角,便可输出此时的太阳高度角  $\alpha$  和太阳方位角  $\gamma$ ,程序设
计简单,可移植性好,运行效率高。
```

3 实验测试与分析

3.1 方位角误差测试

为验证所设计太阳自动跟随系统的性能,在室外进行了实地测试。表 1 给出了 2017 年 3 月 25 日,所在位置:上海理工大学(东经 121.56°,北纬 31.30°)11:00~13:00 的跟踪太阳方位角数据。在测试的过程中,间隔 30 min 记录一次,利用美国可再生能源实验室 PSA 算法来计算太阳当前方位信息,进行初步跟踪后再利用四象限硅光传感器由于光斑的偏离导致的各象限输出电压的不一致,来驱动双轴电机二次跟踪,以此实现对太阳的精确跟踪。从表 1 的数据可知,对准后的系统跟踪误差不超过 $\pm 0.05^\circ$,满足实验预设的跟踪要求。

表 1 跟踪太阳方位角测量数据

时 间	太阳方位角		
	理论值	测量值	误差
11:00	155.313 4	155.299 5	-0.013 9
11:30	169.989 3	170.026 9	0.037 6
12:00	185.652 1	185.681 8	0.029 7
12:30	200.737 9	200.706 1	-0.031 8
13:00	214.008 1	214.056 6	0.048 5

3.2 吸收光能效率测试

在室外分别进行了固定安装式太阳能吸收效率实验和采用本文二自由度自动跟踪控制系统的能量吸收实验。测试时间为 6:00~18:00,每隔 1 h 记录一次,连续测试 4 d,并将测试结果保存至 SD 卡中,实验完成后,用专业软件将 4 d 中相同时间点能量值取其平均值,对应各时刻的能量变化趋势如图 6 所示。

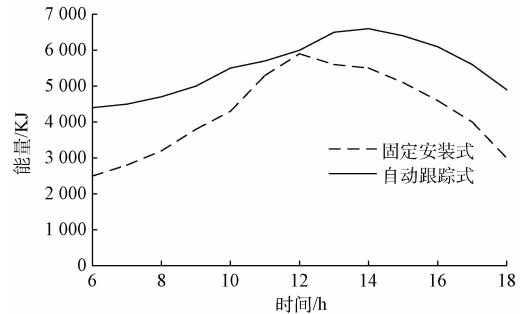


图 6 光伏发电板吸收能量值与时间关系

由图 6 可以看出,虚线表示采用固定式安装方法的光伏发电板随时间的变化,相同面积、相同天气状况下其吸收太阳能效率明显低于本文所设计的全自动跟踪系统的吸收效率^[14]。在正午 12:00 时刻,由式(4)可知此时的太阳时角为 0° ,固定安装式的光伏发电板也正好与太阳光线垂直,所以此时两种方式吸收的太阳能量大小几乎相同。在 14:00 时,采用自动跟踪式控制系统的吸收能量值达到峰值,随后由于太阳光强的自然下降其吸收能量缓慢下降,但是依然远高于传统方式所吸收的能量。

4 结 论

本文设计了以视日运动轨迹法进行的初步开环跟踪,再辅以以 STM32F103 为控制器的双轴步进电机闭环系统对太阳的位置进行精确的二次跟踪,相较于传统的固定角度式安装光伏发电板的方法,本控制系统能够实时跟踪太阳位置,使其始终保持与光伏发电板的垂直照射状态,且误差角度控制在 0.05° 范围内,大大提高了光能利用率以及发电效率。本文还设计了两块硅光电池用于检测当天的阴晴状态,当系统检测到处于阴天状态时,则系统复位,避免盲目跟踪,以节省电能;增加了风速传感器,当大风状态时,为

保护发电装置不受损坏,光伏发电板会实时调节当前方位和仰角,使其受到的风力最小^[15]。最后,在上海理工大学进行了实地测试,结果表明,所设计的控制系统具有成本低廉、运行可靠、跟踪精度高等优点。

参考文献:

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] 王欢,徐小力. 一种新型光伏阵列在线故障检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2765-2772.
- [3] 王大志,何凯,杜如虚. 精确约束二自由度微动角位移机构设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1874-1882.
- [4] 张兴,李俊,赵为,等. 一种光伏独立逆变器非线性控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(2): 252-257.
- [5] 王林军,门静,张东,等. 太阳自动跟踪系统中光电传感器的设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 179-185.
- [6] 王男男,周伦,丁虹民. 基于 STM32 的光伏发电自动跟踪系统设计[J]. 电源技术, 2017, 141(2): 247-249.
- [7] GUO M, WANG Z, SUN F. Simulations of reflected sun beam traces over a target plane for an azimuth-elevation tracking heliostat with fixed geometric error sources[J]. Solar Energy, 2013(97): 102-111.
- [8] 廖小云,高嵩,陈超波. 一种交叉多目标跟踪算法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 65-69.
- [9] 李文才,石岩,孙士蔚. 单驱双轴联动太阳自动跟踪传动装置研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(3): 134-135, 156.
- [10] 马正华,孔丹,徐守坤. 基于步进电机的太阳自动跟踪系统的研究[J]. 电气传动, 2012, 42(3): 37-40, 72.
- [11] 赵培梅,王日宏. 基于嵌入式的太阳自动跟踪系统设计[J]. 计算机科学, 2013, 40(11A): 385-388.
- [12] FENG Q, GENG A H. Design of data acquisition system of four-quadrant photodetector based on LabVIEW[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(5): 1397-1403.
- [13] 耿其东,李春燕. 双轴式太阳跟踪装置控制系统的研究[J]. 机械与电子, 2011(3): 53-56.
- [14] 吕政,唐海萍. 自适应太阳跟踪平台理论分析及控制器设计[J]. 节能技术, 2007, 25(5): 419-422.
- [15] 欧少敏,何志毅. 太阳能光伏辅助市供电系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 45-49, 57.

作者简介

吴琼, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 605614775@qq.com