

# 双轴伺服太阳能跟踪系统的设计

Design of the Dual-axis Servo Solar Energy Tracking System

汤世松 舒志兵

(南京工业大学自动化学院,江苏 南京 210009)

**摘要:** 为了更充分、高效地利用太阳能,设计了基于 PLC 的双轴伺服太阳能跟踪系统。该系统采用视日运动轨迹跟踪方案,控制器根据相关的公式和参数计算出白天太阳的位置,再将高度角和方位角转化成相应的脉冲发送给伺服驱动器,驱动伺服电机实时跟踪太阳。同时,系统使太阳能板随着太阳的高度变化而倾斜,从而获得最大的太阳能。理论分析表明,采用该跟踪技术可以有效地提高能量接收率。

**关键词:** 运动轨迹跟踪 太阳能 跟踪系统 PLC 伺服电机

**中图分类号:** TP275 **文献标志码:** A

**Abstract:** In order to fully utilize solar energy with high efficiency, the dual-axis servo solar tracking system based on PLC has been designed. By adopting sun motion trajectory tracking strategy, the position of the sun in daytime is calculated by controller in accordance with related formula and parameters, then the altitude and azimuth are converted into corresponding pulses to be sent to servo driver; and the servo motor tracks the sun in real time. Therefore, the solar energy panel is always tilting towards the sun when the system tracks the sun from east to west, thus maximum solar energy is obtained. The theoretical analysis indicates that by adopting this tracking technology, the efficiency of receiving solar energy can be increased.

**Keywords:** Motion trajectory tracking Solar energy Tracking system PLC Servo motor

## 0 引言

开发新能源是全世界正共同面临的课题。光伏发电是新能源中最具可持续发展理想特征的可再生能源技术之一,受到全世界的普遍重视并得到迅速发展。光伏发电成本过高是制约其长期高速发展的主要原因,解决途径之一是提高发电系统的发电量,即将平板光伏组件受光面时刻正对太阳,从而在相同的辐照条件下吸收比固定安装光伏组件更多的太阳辐射能量,以达到降低光伏发电成本的目的。

相关理论分析表明,对太阳进行双轴跟踪与非跟踪的能量接收率相差 37.4%。由此可见,太阳能板精确地跟踪太阳可使接收器的热接收效率大大提高,拓宽了太阳能的利用领域<sup>[1]</sup>。

## 1 太阳能伺服跟踪系统设计

### 1.1 太阳跟踪方式的确定

太阳能伺服跟踪系统分类方法有多种。按太阳跟踪方式可分为传感器跟踪和视日运动轨迹跟踪(程序

控制)两种,此外,也可分为单轴跟踪和双轴跟踪<sup>[2]</sup>。

传感器跟踪是利用光电传感器检测太阳光是否偏离电池板法线,当太阳光偏离电池板法线时,传感器发出偏差信号,经放大、运算后控制执行机构,使跟踪装置重新对准太阳光<sup>[3]</sup>。这种跟踪方式的优点是灵敏度高;缺点是受天气影响大,阴雨天无法对准太阳,甚至引起执行机构的误动作。视日运动轨迹跟踪(程序控制)是根据太阳的实际运行轨迹,按预定的程序调整跟踪装置跟踪太阳。这种跟踪方式能够全天候实时跟踪,虽然精度不高,但是符合实际运行情况,因此应用较广泛。单轴跟踪只是在方位角跟踪太阳,而在高度角作季节性调整。双轴跟踪是在方位角和高度角两个方向跟踪太阳轨迹。因此,双轴跟踪的效果优于单轴跟踪。

目前,以双轴跟踪为基础的传感器双轴跟踪或程序控制双轴跟踪方式被普遍采用。在美国加州建造的发电功率约为 300~600 MW 的太阳能斯特林电厂中,所有太阳能集热器均采用双轴跟踪系统。

### 1.2 视日运动轨迹跟踪设计

太阳每天东升西落,站在地球表面的人能够观测到太阳有规律地运动。视日运动轨迹跟踪就是利用 PLC 控制单元根据相应的公式和参数,计算出白天太阳的实时位置,再转化为相应的脉冲发送给伺服驱动

修改稿收到日期:2009-12-04。

第一作者汤世松,男,1985年生,现为南京工业大学控制理论与控制工程专业在读硕士研究生;主要从事交流伺服运动控制、伺服电机、机电一体化和 PLC 方面的研究。

器,驱动伺服电机实时跟踪太阳,以达到对太阳进行实时跟踪的目的。太阳在天球上的位置可由太阳高度角 $\alpha_s$ 和太阳方位角 $\gamma_s$ 确定。太阳高度角 $\alpha_s$ 又称为太阳高度或太阳俯仰角,是指太阳光线与地表水平面之间的夹角( $0 \leq \alpha_s \leq 90^\circ$ )<sup>[4]</sup>,可由下式计算得出:

$$\sin \alpha_s = \sin \vartheta \sin \delta + \cos \vartheta \cos \delta \cos \omega \quad (1)$$

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

式中:各角度单位均为 $^\circ$ 。其中, $\vartheta$ 为当地纬度角; $\delta$ 为太阳赤纬角,春分和秋分时 $\delta = 0^\circ$ ,夏至时 $\delta = 23.5^\circ$ ,冬至时 $\delta = -23.5^\circ$ ; $\omega$ 为时角,是用角度表示的时间; $n$ 为1年中的日期序号,从1月1日开始, $n = 1$ ,每往后加一天,即 $n = n + 1$ 。

太阳方位角 $\gamma_s$ 是指太阳光线在水平面上的投影和当地子午线的夹角<sup>[4]</sup>,即:

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha_s \sin \vartheta - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \vartheta} \quad (3)$$

式(1)~(3)中的赤纬角 $\delta$ 和时角 $\omega$ 的计算需要通过时间确定。

由于太阳在一年中的时角运动很复杂,日常生活中的钟表时间采用平均太阳时(简称平太阳时, $t$ ),即太阳沿着周年运动的平均速率。真太阳时(即太阳时, $t_0$ )与平太阳时之差即称为时差,在工程计算中就会存在时差问题。因此,必须采用真太阳时,以达到实际计算中的精度要求。为了得到准确的真太阳时,可以根据定时标准来校正时差值,我国区域的时差 $e$ 确定如下<sup>[5]</sup>:

$$e = 0.0172 + 0.4281 \cos \beta - 7.3515 \sin \beta - 3.3495 \cos 2\beta - 9.3619 \sin 2\beta \quad (4)$$

$$\beta = \frac{360}{365} (n - 1) \quad (5)$$

$$t_0 = t + (\text{longitude} - 120^\circ) / 15 + e / 60 \quad (6)$$

式中:longitude为光伏发电地点的地理经度,中国地区的北京标准时间的经度为 $120^\circ$ ;  $t$ 为北京时间。

因为地球每24h自转1圈,所以每 $15^\circ$ 为1h;且正午时,时角 $\omega = 0^\circ$ ,上午时 $\omega > 0^\circ$ ,下午时 $\omega < 0^\circ$ ,则 $\omega$ 可由下式计算得到,即:

$$\omega = 15(12 - t_0) \quad (7)$$

当太阳在正南方向时,式(3)中的方位角 $\gamma_s = 0^\circ$ ;正南以西时, $\gamma_s > 0^\circ$ ;正南以东时, $\gamma_s < 0^\circ$ 。为有效跟踪太阳的位置,除了要计算出太阳的实时位置外,还需要知道具体某天的日出时角 $\omega_1$ 和日落时角 $\omega_2$ 。由于日出日落时,太阳高度角 $\alpha_s = 0^\circ$ ,因此,由式(1)可计算出:

$$\omega = \arccos(-\tan \vartheta \tan \delta) \quad (8)$$

且根据时角 $\omega$ (上午时 $\omega > 0^\circ$ ,下午时 $\omega < 0^\circ$ ),得到日出时角的表达式为:

$$\omega_1 = \arccos(-\tan \vartheta \tan \delta) \quad (9)$$

$$\omega_2 = -\arccos(-\tan \vartheta \tan \delta) \quad (10)$$

计算出日出时角和日落时角后,由式(7)可得出日出时间 $T_1$ 和日落时间 $T_2$ ,即:

$$T_1 = 12 - \omega_1 / 15 \quad (11)$$

$$T_2 = 12 + \omega_2 / 15 \quad (12)$$

### 1.3 控制系统核心部件 PLC

可编程逻辑控制器 PLC 是太阳能跟踪系统的核心部件<sup>[6]</sup>。本系统采用结构紧凑、配置灵活且指令集强大的欧姆龙公司 CP1H-X 系列 PLC。用户程序包括浮点数运算、定时器和脉冲指令输出等复杂的数学运算以及特殊功能寄存器指令内容,使 CX-Programmer 能够监视输入状态,改变输出状态,从而达到控制的目的。另外,选用 CP1H 不仅能用于独立的太阳能设备跟踪系统控制,而且能在串并联的大型光伏太阳能阵列的跟踪系统控制中发挥 PLC 现场总线的控制优势,进行集中控制。

### 1.4 风速传感器模块

为保护跟踪装置组件不被大风吹坏,设计了大风响应中断子程序。当风速达到 13 m/s 时,风速传感器输出脉冲信号,程序进入高速脉冲中断响应子程序,太阳能电池板自动放平并停止跟踪,大风过后 5 min,快速自动恢复跟踪<sup>[7]</sup>。

风速传感器可以对多个太阳电池方阵进行群控,具有可靠性高、抗干扰能力强和使用方便以及适合恶劣工作环境等特点。

### 1.5 控制系统硬件电路的设计

系统的控制硬件基本由欧姆龙 PLC、欧姆龙电机及其驱动器组成。

一天中,只要跟踪器能获得最优的俯仰角和方位角,电池板就能接收到最大的太阳辐射量。系统由一台欧姆龙伺服电机和减速机构成方位角转动机构,并由另一台欧姆龙伺服电机和直线推杆构成高度角转动机构。光伏跟踪系统设计采用了开环程序控制方式,避免了偶尔因云层遮挡对太阳能伺服跟踪系统造成的干扰。

视日运动轨迹跟踪方案的具体步骤为:首先用一套公式通过下位机 PLC 计算出在太阳给定时间的位置,即实际时刻太阳所在高度角和方位角;然后计算出跟踪装置被要求的位置,将这个位置乘以相关比例系数,即可得到高度角和方位角电机所需的脉冲,并发送

给伺服驱动器;最后驱动电机转动装置,达到要求的位置,实现对太阳高度角和方位角的跟踪<sup>[8]</sup>。跟踪系统结构图如图1所示。

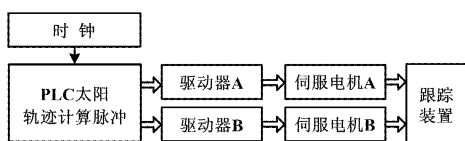


图1 跟踪系统结构图

Fig.1 Structure of the tracking system

利用逆变器能够将光伏电池产生的直流电转变为交流电,进而直接输送到电网上。在白天有日照的情况下,光伏电池会将大部分的能量输送到电网上;晚上光伏电池装置则会自动与电网断开。

本文所设计的跟踪装置主要由底座、立轴、横轴、两台伺服电机、传动齿轮副和丝杆导轨等组成。其中一台伺服电机驱动传动齿轮副,使传动齿轮副驱动立轴,令其跟踪太阳方位角的变化;另一台伺服电机驱动直线推杆,支撑太阳能电池板绕横轴作俯仰动作,以跟踪太阳高度角的变化。

控制系统的实现取决于电机控制部分和驱动部分以及风速传感器两方面。对于电机控制部分和驱动部分,我们选择领域中相对有优势的厂商的部件,尤其需考虑运行温度范围(-25~+55℃)和环境。

跟踪器的运行状态可传送给监测台。跟踪装置不仅可被用来监测,还可以实现远程控制。系统在扩展和配置设计中应遵循以下原则。

- ① 尽可能选择典型电路,为硬件系统的标准化和模块化打下基础;
- ② 系统的扩展与外围设备配置的水平应充分满足应用系统的功能要求,并留有适当余地,以便进行二次开发;
- ③ 硬件结构应结合应用软件方案一起考虑;
- ④ 系统中相关器件要尽可能做到性能匹配。

## 2 系统软件设计

跟踪模式的判断过程完全由软件实现,灵活度很高,可针对不同的地区和不同的气候进行调整,从而提高光伏电站的发电效率。同时,可根据需要增加光强传感器和风力传感器等多种传感装置。

太阳能电池板有X、Y两个调整方向,控制机构将分别对这两个方向进行调整。跟踪装置安装了限位触感器,当电池板转到限位触点时,跟踪装置自动切断脉冲输出,电机停止动作,起到硬件保护作用。图2为跟

踪控制系统程序流程。

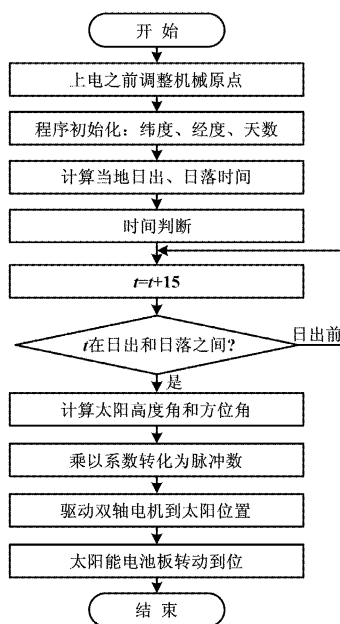


图2 跟踪控制系统程序流程图

Fig.2 Program flowchart of the tracking control system

当有大风来临时,风速传感器响应中断子程序,PLC接收到风速传感器的高速脉冲,达到规定的脉冲数时则响应中断,使太阳能电池板放平,以保护电池板组件。

图3为大风中中断子程序框图。

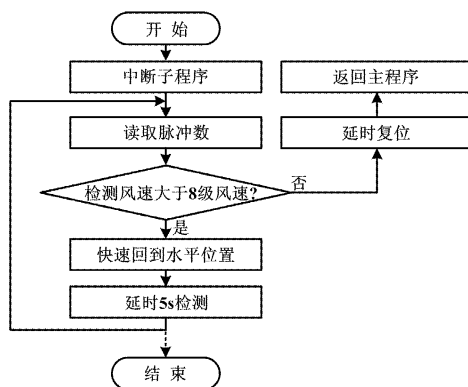


图3 大风中断子程序流程图

Fig.3 Interrupting subroutine of the strong wind

## 3 结束语

本文介绍了一种双轴伺服太阳能自动跟踪系统。该系统能自动检测昼夜并实时跟踪太阳,从而提高了发电效率。

系统以欧姆龙PLC作为控制器,计算出太阳的实时位置并转化为脉冲发送给伺服驱动器;由驱动电机转动跟踪装置跟踪太阳,从而使得该自动跟踪系统的

(下转第55页)

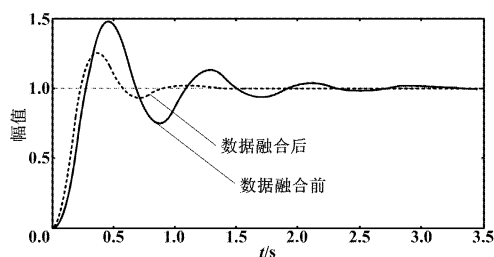


图6 阶跃响应曲线

Fig. 6 Curves of step response

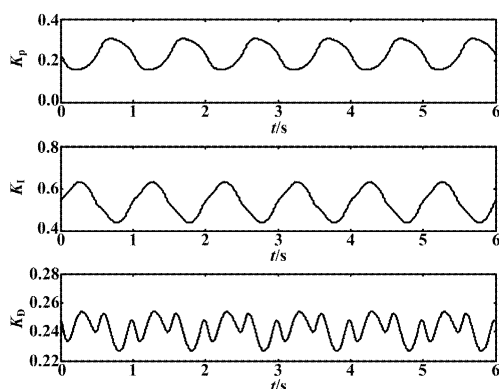


图7 正弦信号下PID整定曲线

Fig. 7 PID tuning curves under sine signal

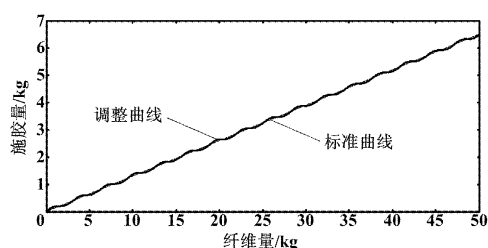


图8 施胶比曲线

Fig. 8 Curves of gluing ratio

## 5 结束语

基于多传感器融合技术的并行在线调施胶系统性能得到了很大的提升,调施胶比例控制更加精确,减少了浪费,系统连续运行能力更加可靠。系统得到明显改善主要有以下几个原因:①在施胶的关键环节增加了传感器的数量,提高了数据检测的全面性;②在技术上运用了数据融合的方法,避免了以往单一传感器检测带来的随机误差,同时,综合考虑各方面的数据,并适当运用神经网络方法;③各传感器都是并行的在线检测,实现了动态监测和动态调节控制。

### 参考文献

- [1] Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1993, 115(28): 220-223.
- [2] 刘亚秋,宋文龙,王代琳. 基于并联组称原理的 Micro-D 型智能调施胶系统研制[J]. 自动化仪表, 2007, 28(1): 1-6.
- [3] 华毓坤. 人造板工艺学[M]. 北京:中国林业出版社, 2002: 165-188.
- [4] 祖海燕,陈雪梅,张怡卓. 中密度纤维板调施胶技术的应用和发展趋势[J]. 木工机床, 2007(2): 10-13.
- [5] 唐铨峰,花军,苏威. 绿色人造板调施胶技术发展趋向[J]. 林业机械与木工设备, 2004, 32(1): 4-6.
- [6] 王耀南,李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(5): 518-521.
- [7] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2003: 160-183.
- [8] 黎果,李志蜀,李奇,等. 基于神经网络的多传感器融合技术研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(16): 145-147.
- [9] 阎平凡,张长水. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 北京:清华大学出版社, 2000: 10-32.
- [10] 朱玉鹏. 信息融合的神经网络原理及应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004.

### (上接第51页)

准确性高、可靠性强,即使在天气变化比较复杂的情况下该系统也能正常工作,有利于提高太阳能的利用率<sup>[9]</sup>。将系统应用于太阳能电池板,可将电池板输出的直流电直接逆变为交流电,无需另外输入能量就可以获取电能。

### 参考文献

- [1] Abdallah S, Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(11-12): 1931-1939.
- [2] Sefa I, Demirtas M, Colak I. Application of one-axis sun tracking system[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(11): 2709-2718.

- [3] Roth P, Georgiev A, Boudinov H. Design and construction of a system for sun tracking[J]. Renewable Energy, 2004, 29(3): 393-402.
- [4] 沈辉,曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2009: 6-8.
- [5] Shen Chao, He Yaling, Liu Yinwen, et al. Modelling and simulation of solar radiation data processing with Simulink[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(7): 721-735.
- [6] 程子华,刘小明. PLC原理与编程实例分析[M]. 北京:国防工业出版社, 2007: 10.
- [7] 刘四洋,伍春生,彭燕昌,等. 主动式双轴太阳跟踪控制器[J]. 可再生能源, 2007, 25(6): 69-72.
- [8] 王森,王保利,焦翠坪,等. 太阳跟踪系统设计[J]. 电气技术, 2009(8): 100-103.
- [9] 帅麒,朱华. 太阳能光伏组件在不同跟踪方式下的发电量比较[J]. 中国高新技术企业, 2009(4): 136-137.