

塔式太阳能热发电站中的定日镜跟踪装置研制

郭铁铮¹, 刘德有¹, 钱艳平¹, 陈强², 卞新高¹, 郭苏¹

- (1. 河海大学动力工程系, 江苏省 南京市 210098;
2. 南京中材天成新能源有限公司, 江苏省 南京市 210012)

Development of Heliostat Tracking Device in Solar Power Tower Plant

GUO Tie-zheng¹, LIU De-you¹, QIAN Yan-ping¹, CHEN Qiang², BIAN Xin-gao¹, GUO Su¹

- (1. Department of Power Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China;
2. Zhongcai Tiancheng New Energy Co. Ltd., Nanjing 210012, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The control mode of open loop is generally used for heliostat tracking devices in solar power tower plants, which has the shortcomings of, e.g., low tracking accuracy, high accumulation errors etc. For that, a new type of tracking device using double-axes drive gear is introduced in this paper, including the hardware design, work principle and control strategy. The combination control mode of open and closed loop is adopted for the control system of the tracking device, using DSP (TMS320F2812) as its controller, communicates with the monitor computer which sends the solar position data and control commands. From the experimental results, the new tracking device has the advantages of reasonable design, steady operation and rapid reaction, besides, the real-time tracking accuracy can be higher than 3.5 mrad and overshoot is less than 3.2%, which make heliostat be able to realize the real-time and accurate tracking.

KEY WORDS: solar power tower; heliostat; tracking device; DSP controller; combination of open-closed loop

摘要: 针对塔式太阳能热发电站中定日镜跟踪装置通常采用开环控制方式, 存在跟踪精度低、累积误差大等缺点, 该文介绍了一种采用双轴传动机构的新型跟踪装置硬件设计、工作原理和控制策略。该装置的控制系统采用开-闭环结合的控制方式, 以 DSP(TMS320F2812)作为控制器, 与发送太阳位置信息和控制命令的监控计算机实时通信。实验结果表明, 该跟踪装置设计合理, 运行稳定, 反应速度快, 实时跟踪精度优于 3.5 mrad, 超调量小于 3.2%, 实现了定日镜的实时精准跟踪。

关键词: 塔式太阳能热发电; 定日镜; 跟踪装置; 数字信号处理控制器; 开-闭环结合

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2006AA050104)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2006AA050104) .

0 引言

由于太阳能存在密度低、间歇性、空间分布不断变化等特点, 因此其收集和利用的难度较大、成本较高。塔式太阳能热发电是太阳能热利用的一个重要发展方向^[1], 而高精度太阳光跟踪装置的研制是其重点内容之一。定日镜是塔式太阳能热发电站中用于跟踪太阳并聚集和反射太阳光进入位于接收塔顶部吸热器内的重要设备^[2-5], 其跟踪精度和稳定性明显影响太阳能的利用效果。

针对目前定日镜跟踪装置通常采用开环控制方式, 存在跟踪精度低、累积误差大等缺点^[6], 本文研制的定日镜跟踪装置采用了双轴传动机构和开-闭环结合的控制方式, 以 DSP(TMS320F2812)作为控制器。监控计算机根据太阳运行规律计算太阳位置信息, 实时发送至控制器, 控制器返回定日镜运行数据和状况信息, 方便人员远程监控和后期数据处理。以 DSP 为控制核心的跟踪系统具有可靠性强、跟踪反应速度快、稳定性好等优点, 为跟踪装置实时准确的跟踪太阳光提供了平台。

1 跟踪装置结构及工作原理

定日镜包括反射镜、跟踪传动机构、闭环跟踪传感器及其跟踪控制系统, 其装置结构示意图如图 1 所示。入射太阳光线经过定日镜面反射, 其反射太阳光线穿过闭环跟踪传感器, 投射到吸热器内。而跟踪装置中的方位角、高度角电机和闭环跟踪传感器用来驱动定日镜精准跟踪太阳光, 当太阳相对运动时, 跟踪控制系统通过控制定日镜面角度, 使定日镜面中心、闭环跟踪传感器与吸热器始终成“三点一线”。跟踪装置配置 UPS 备用电源,

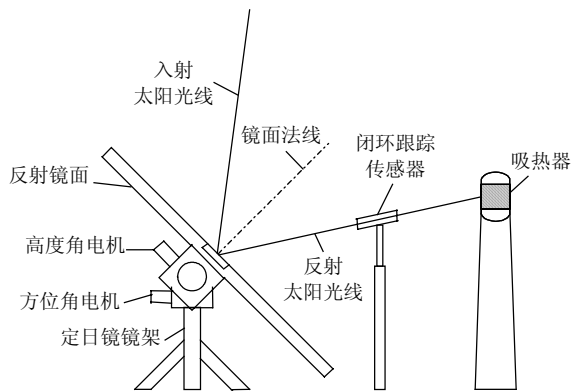


图 1 跟踪装置结构示意图

Fig. 1 Sketch map of tracking device structure

使定日镜即使在电网故障时仍然能够安全撤离运行区。

图 2 是跟踪装置的控制原理图。采用双轴跟踪传动机构，控制定日镜方位角和高度角方向的转动^[7]。由于太阳的相对运动，当反射太阳光产生偏离误差超过容许值时，监控计算机根据太阳运行规律和定日镜经纬度及其几何关系等，计算入射太阳光方位角和高度角，并发送至控制系统，然后由定日镜角度计算模块，计算出定日镜方位角和高度角方向的旋转角度，输出控制脉冲，驱动方位角、高度角电机按设定的方向、位置转动，达到预定位置，并实时读取高度、方位角编码器角度值，实现开环控制。闭环跟踪传感器在定日镜开环控制预定位置处进行精确定位，通过控制算法，修正反射太阳光的偏离误差，当反射太阳光的偏离误差消除后，控制系统控制异步电机停止转动，完成一个控制周期。当下一次反射太阳光偏离误差产生时，重复以上的控制过程，实现定日镜的精准跟踪。

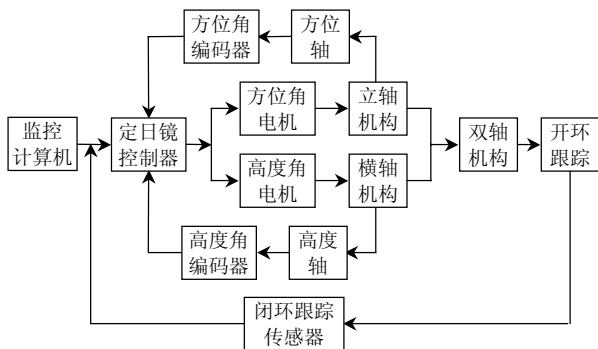


图 2 跟踪装置控制原理图

Fig. 2 Control principle of tracking device

2 跟踪控制方案和策略

在太阳能热发电系统中，常见的跟踪控制方式，按被控制量对控制量是否存在反馈，可分为开环控制方式和闭环控制方式两种，国外已建示范电

站大多采用开环控制方式^[8]。

开环控制是根据太阳运行规律、定日镜位置(经纬度)和吸热器位置等参数及其几何关系，计算定日镜的控制方向，此类控制的优点是费用低、控制简单，缺点是由于机械加工精度和传动机构等原因会存在累积误差，而且其自身无法消除，需要定期校正。闭环控制是采用光电传感器检测太阳光的位置，从而控制执行机构运动，达到准确聚集太阳光的效果^[9-10]，这种控制的优点是控制精度较高，致命的缺点是当多云或阴雨天时，感光元件在稍长时间段接受不到太阳光，可能导致跟踪系统的控制失效，甚至引起执行机构的误动作。

经分析研究，为提高定日镜跟踪精度，消除累积误差，本文利用双轴跟踪传动机构，采用开-闭环结合的控制方式，该方式吸收了前两种控制方式的优点，开环粗略计算调整定日镜的位置，闭环校正、消除累积误差，使之在任何气候条件下都能达到稳定而可靠的跟踪控制效果。

3 跟踪传动机构

本文装置传动机构采用立轴和横轴双轴机构，即方位角和高度角传动机构。传动机构流程为：异步电机-谐波减速器-齿轮-横轴、立轴结构-反射镜。选用异步电机时，必须根据实现跟踪所需要的扭矩来计算电机功率。首先计算末端传动轴所受的实际扭矩，再根据减速倍数和传动效率估算出所需电机的扭矩，考虑到失步和摩擦的问题，电机扭矩保留 100%的余量比较可靠。

目前，减速机构有蜗轮蜗杆传动结构、齿轮结构、谐波减速结构等。蜗轮蜗杆传动具有传动比大、降速快、能自锁等优点；齿轮传动具有传动比准确、传递扭矩大的优点。这两种结构在传动时存在着较大的间隙，不能满足设计要求(跟踪精度优于 3.5 mrad)。因此，本文跟踪装置采用了先进的谐波减速结构。谐波传动是利用柔性元件可控的弹性变形来传递运动和动力。它具有传动比大、精度高、空回小、效率高、体积小、传动平稳等优点^[11]。

经过测试，定日镜在夏日某天 9~16 时的方位角大约转动 140°左右，因此传动机构选用两相异步电机(保持转矩 7.6 N·m，步距角 1.8°)，谐波减速器传动比 1:50，驱动器选用 4 细分，则电机转动 200°，反射镜相应转动 1°。异步电机步距角为 1.8°/4=0.45°，故反射镜每转动 1°时，控制器需发 200/0.45 个脉冲。同理，可求得高度角的传动控制脉冲。

4 跟踪控制系统

4.1 控制系统硬件组成

本文定日镜跟踪控制系统采用了DSP系列中的TMS320F2812作为处理器，主频达到150MHz。该系统由主控制器、闭环跟踪传感器和监控计算机等组成，如图3所示。主控制器包括：DSP控制电路、RTC实时时钟、数字信号输入输出单元、模拟信号输入单元、信号放大电路、外部存储器、人机界面装置和显示装置、看门狗电路以及二路串口通信接口(采用RS485接口，其中一路用于与监控计算机通信，另一路与方位角和高度角编码器通信)。人机界面装置和显示装置分别采用键盘和液晶。

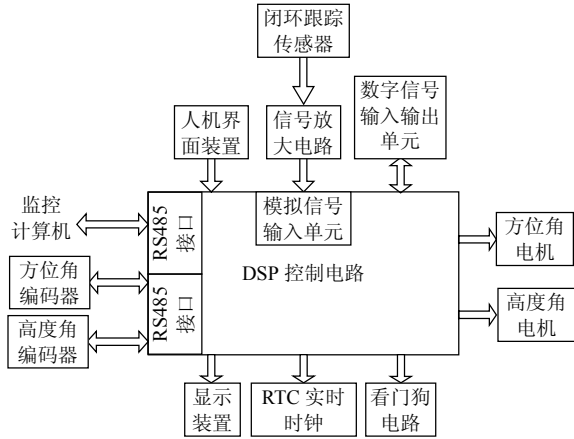


图3 控制系统硬件设计

Fig. 3 Hardware design of control system

闭环跟踪传感器通过信号放大电路与主控制器的模拟信号输入单元相连，它采用4块光电池，安装在一个圆柱形的传感器壳内，每对光电池被中间隔板隔开，对称地放在隔板两侧，分别代表东、西、南、北4个方向。当镜面中心、闭环跟踪传感器和吸热器“三点一线”时，反射太阳光线平行于隔板，4块光电池感光量相等，输出电信号相同。当反射太阳光略有偏移时，隔板的阴影落在光电池上，使其中某个方向的光电池感光量不等，输出电信号也随之变换。控制器采集到某个方向的电信号变化，通过控制算法，控制异步电机运动^[12]，直到4块光电池输出电信号再次相同，则停止电机运动。

4.2 控制系统人机界面设计

控制器液晶显示分为4级菜单，如图4所示。主画面显示当前时间，由监控计算机发送时间信息，校准实时时间。第1级菜单包括运行方式切换、初始坐标设置和系统状态显示。手动控制实现定日镜方位角和高度角移动；而快速移动包括回初始点、镜面翻转、扫雪，可以在定日镜启动、停止、

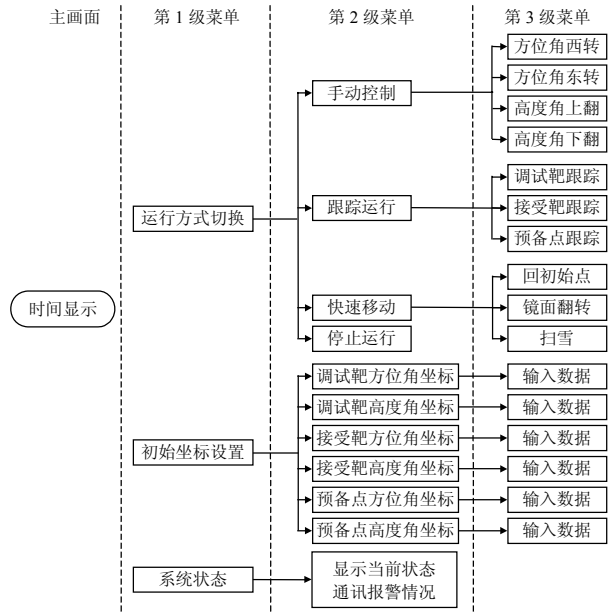


图4 控制机器人机界面

Fig. 4 Man-machine interface of controller

遇风保护和雨雪天气中使用。

初始点是定日镜清晨启动时，所有定日镜处于镜面朝向东面、镜面垂直地面的位置。镜面翻转是指将定日镜镜面朝下，以保护镜面的完整和清洁。扫雪功能是将定日镜镜面垂直于地面，以便在大雪天气时，减轻定日镜雪负荷和清洁镜面上的积雪。跟踪运行可分为接受靶跟踪、调试靶跟踪和预备点跟踪，接受靶跟踪使定日镜实时跟踪太阳，将太阳光反射到吸热器内。调试靶跟踪是太阳光聚焦定位于空中某点，这个定位点称为调试靶，其坐标可根据实际需要设定。一般调试点设定在吸热器附近，以便光斑可以快速引向吸热器。一台未经过调试的定日镜先对调试点进行跟踪测试，性能稳定后转入接受靶跟踪。预备点跟踪用于在热力系统启动前和故障状态下相关定日镜跟踪进入预设的跟踪点。

4.3 控制系统软件设计

4.3.1 系统运行模式

系统运行模式分为正常跟踪模式和异常运行模式。正常跟踪模式定义为：每日清晨(如7:30，该时间预先设置)定日镜启动，首先回初始点状态，然后进入自动接收靶跟踪模式，在每日晚上(如16:30，该时间预先设置)定日镜停止运行，定日镜回到停止点(即镜面翻转状态)。异常运行模式包括手动控制、快速移动控制等。为了提高系统运行的可靠性，还设有自动防风保护功能，当风力达到8级以上时，通过风速传感器检测到风速报警信号后，由监控计算机发送镜面翻转指令，使定日镜镜面快速

收平，当风力降下来时，延迟 15 min，解除防风状态，恢复定日镜跟踪过程。

4.3.2 系统通信模式

监控计算机完成各种控制命令的发送，包括定日镜返回初始点、镜面翻转、接受靶跟踪、调试靶跟踪和实时状态查询等命令，并根据太阳运行轨道计算出太阳时刻位置。控制系统数据通信采用 Modbus RTU 通信协议标准，通过 RS485 接口实现与定日镜控制器的通信。通讯过程分为应答方式和广播方式，对接受靶跟踪和调试靶跟踪，监控计算

机采用广播方式，每隔 2 s 对控制器发送入射太阳光数据，并定时对控制器的时间进行校准。其他如实时状态查询控制命令，采用应答方式，控制器接收到命令后，将定日镜运行状态、绝对位置、跟踪点信息、各电机工作状态、故障信号及种类、目标值数据以及反馈数据返回监控计算机，监控计算机对目标数据和反馈数据以趋势图的形式直观显示，以便观察跟踪效果。同时，监控计算机将数据存储到文本，方便后期离线处理。表 1 为监控计算机向定日镜控制器发送的控制命令格式。

表 1 监控计算机向定日镜控制器发送的控制命令格式

Tab. 1 Format of control order send to heliostat controller by monitor computer

字节顺序	内容	时间校准命令	入射光线角度数据发送命令	实时运行状态查询命令	返回初始点命令	镜面翻转命令	扫雪命令	预备点跟踪命令	接收靶跟踪命令	调试靶跟踪命令
1	目的(从设备)ID	FFH 广播命令	FFH 广播命令	xxH	xxH	xxH	xxH	xxH	xxH	xxH
2	命令代码	00H	01H	10H	11H	12H	13H	20H	21H	22H
3	数据长度 N	06H	04H	00H	00H	00H	00H	00H	00H	00H
4	数据	年(07H)	方位角 高 8 位	CRC 高 8 位	CRC 高 8 位	CRC 高 8 位	CRC 高 8 位	CRC 高 8 位	CRC 高 8 位	CRC 高 8 位
5	数据	月(06H)	方位角 低 8 位	CRC 低 8 位	CRC 低 8 位	CRC 低 8 位	CRC 低 8 位	CRC 低 8 位	CRC 低 8 位	CRC 低 8 位
6	数据	日(0FH)	高度角 高 8 位	—	—	—	—	—	—	—
7	数据	时(0AH)	高度角 低 8 位	—	—	—	—	—	—	—
8	数据	分(31H)	CRC 高 8 位	—	—	—	—	—	—	—
9	数据	秒(1BH)	CRC 低 8 位	—	—	—	—	—	—	—
10	数据	CRC 高 8 位	—	—	—	—	—	—	—	—
11	数据	CRC 低 8 位	—	—	—	—	—	—	—	—

注：1—数据串内每字节数据均以十六进制数表示；2—时间校准命令和太阳入射光线角度数据发送命令为广播命令，目的地址以 FFH 表示；定日镜控制器接收到广播命令不返回数据，接收到其余 7 个命令则均应返回数据；3—时间校准命令中括号内的十六进制数据表示时间为 2007 年 6 月 15 日 10 时 49 分 25 秒；4—高度角和方位角数值(0~31 416)表示角度值(-1.570 8~+1.570 8 rad)，精确到 0.000 1 rad。

4.3.3 定日镜角度计算

根据监控计算机发送的太阳方位角和高度角，可以计算出定日镜在方位角和高度角的旋转角度(角度方向都以顺时针为正)。如图 5 所示，X、Y、Z 是三维坐标系，其中以过塔顶吸热器入口断面中心点 A(接受靶)的向上垂线方向作为 Z 轴方向，以塔正北方向为 Y 轴正半轴方向，塔正东方向为 X 轴正半轴方向，X-Y 平面为定日镜镜面中心点所在平面。B 点为定日镜面中心点、C 点为太阳光入射点。CB、BA 分别是 B 点处的入射太阳光线和反射到接受靶的反射光线，且 |BC|=|AB|。BE 是经过 B 点的定日镜面法线，CD 和 EF 是点 C 和 E 在 X-Y 平面的垂线，点 D 和 F 为垂足。α 为太阳高度角；β 为太阳方位角；定日镜方位角以 Y 轴正半轴方向为基准；定日镜高度角以 X-Y 平面为基准^[13-14]；设 |BC|=|AB|=a，|CD|=b，|OA|=h，|BD|=k，O 为原点，B 点坐标为(x, y, 0)，D 点坐标为(x', y', 0)。

图 5(a) 为太阳光线从接受靶的东面入射，图 5(b) 为太阳光从接受靶的西面入射。

1) 定日镜高度角计算。定日镜高度角即求定日镜的法线 BE 与 X-Y 平面夹角，用 θ 表示，θ=∠EBF，0<θ<π/2。如图 5 所示，三角形 ABC 即为等腰三角形，且 BE 垂直平分 AC，可得 F 点坐标为(x'/2, y'/2, 0)。

$$a = \sqrt{h^2 + x^2 + y^2} \tag{1}$$

$$b = a \sin \alpha \tag{2}$$

$$k = a \cos \alpha \tag{3}$$

根据图 5(a)，可得

$$\sin \beta = \cos(\beta - 90^\circ) = \frac{x' - x}{k} \tag{4}$$

$$\cos \beta = \sin(90^\circ - \beta) = \frac{y' - y}{k} \tag{5}$$

根据图 5(b)，可得

$$\sin \beta = -\cos(270^\circ - \beta) = \frac{x' - x}{k} \tag{6}$$

$$\cos \beta = \sin(\beta - 270^\circ) = \frac{y' - y}{k} \quad (7)$$

$$|EF| = \frac{b+h}{2} \quad (8)$$

$$|FB| = \sqrt{\left(x - \frac{x'}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{y'}{2}\right)^2} \quad (9)$$

$$\tan \theta = \frac{|EF|}{|FB|} \quad (10)$$

联立式(1)~(10), 得

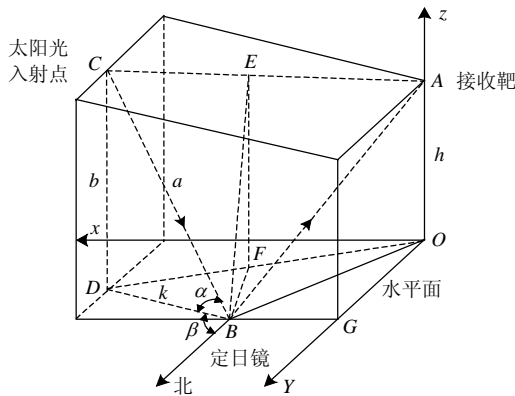
$$\theta = \arctan\left\{\frac{\sin \alpha \sqrt{h^2 + x^2 + y^2} + h}{(h^2 + x^2 + y^2) \cos^2 \alpha - 2 \cos \alpha \sqrt{h^2 + x^2 + y^2} \cdot (x \sin \beta - y \cos \beta)}\right\}^{1/2} \quad (11)$$

2) 定日镜方位角计算。定日镜方位角即求定日镜法线在 X-Y 平面的投影 BF 在 X-Y 平面内与 Y 轴正向的夹角, 用 φ 表示, $\pi/2 < \varphi < 3\pi/2$ 。

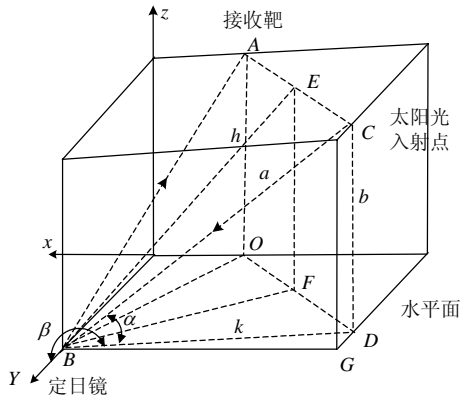
由图 5(a)和图 5(b), 得

$$\sin \lambda = \frac{x - x'/2}{|FB|} \quad (12)$$

式中 λ 为定日镜法线在 X-Y 平面的投影 BF 与 Y 轴负半轴方向的夹角。



(a) 太阳光入射图(早晨)



(b) 太阳光入射图(下午)

图5 太阳光入射图

Fig. 5 Incidence map of sun's rays

联立式(4)、(5)、(9)、(12), 得

$$\lambda = \arcsin\left\{\frac{(x - \cos \alpha \sin \beta \cdot \sqrt{h^2 + x^2 + y^2}) / [x^2 + y^2 + (h^2 + x^2 + y^2) \cos^2 \alpha - 2 \cos \alpha \cdot \sqrt{h^2 + x^2 + y^2} \cdot (x \sin \beta - y \cos \beta)]^{1/2}}{\right\} \quad (13)$$

$$\varphi = \lambda + \pi \quad (14)$$

4.3.4 系统程序流程

系统采用结构化程序设计思想, 其程序流程如图 6 所示。主要由主程序模块、系统初始化模块、RS485 模块、控制算法模块、定日镜角度计算模块、控制脉冲模块、闭环跟踪传感器模块、限位控制模块以及外部中断响应模块组成。主程序模块是其它各个模块的调度模块^[15], 系统初始化包括初始化系统控制标志位、设定系统中断响应方式、系统定时器/计数器工作方式、初始化PIE控制器和参数表、初始外设寄存器和外部AD。RS485 模块是接受来自监控计算机的太阳光方位和高度角数据以及采集方位和高度角编码器读数。而定日镜角度计算则依据前面接受到的太阳光方位和高度角, 计算出定日镜转动的角度。控制脉冲模块根据计算出的定日镜转动角度, 发出控制脉冲信号^[16], 驱动异步电机按设

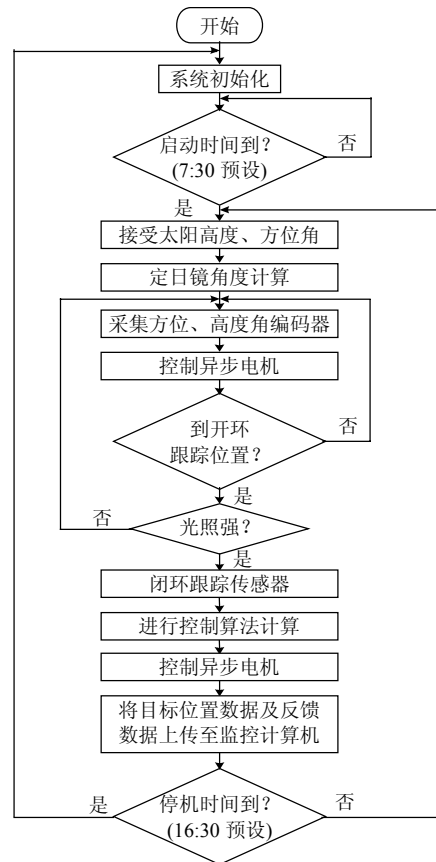


图6 系统程序流程图

Fig. 6 Flow diagram of system program

定的位置和速度转动^[17]。闭环跟踪传感器模块是采集光照强度和 4 个方向的电信号，通过比较算法、PID 算法与补偿控制算法相结合，从而驱动异步电机精准跟踪^[18]。限位控制模块采集限位信号，对跟踪装置的初始和停止位置进行设置。而外部中断响应程序根据中断的位置和不同的方式响应中断程序。

5 结论

本文针对常见定日镜跟踪装置大多采用开环控制方式，存在跟踪精度低，具有累积误差等缺点，研制了采用开-闭环相结合控制方式的定日镜跟踪装置，实现了定日镜的精准跟踪，其跟踪精度优于 3.5 mrad，超调量小于 3.2%。经测试证明，该装置设计合理，角度计算准确，性能稳定，实时跟踪响应速度快，其处理器 DSP(TMS320F2812) 具有较高主频和运算能力，有利于定日镜角度计算和复杂控制算法的应用，保证了处理信号的快速性和实时性，具有很好的开发应用价值。

参考文献

- [1] Romero M, Marcos M J, Tellez F M, et al. Distributed power from solar tower systems: a MIUS approach[J]. *Solar Energy*, 1999, 67(4-6): 249-264.
- [2] Igel E A, Hughes R L. Optical analysis of solar facility heliostats [J]. *Solar Energy*, 1979, 22(3): 283-295.
- [3] Chen Y T, Chong K K, Lim C S, et al. Report of the first prototype of non-imaging focusing heliostat and its application in high temperature solar furnace[J]. *Solar Energy*, 2002, 72(6): 531-544.
- [4] Chen Y T, Chong K K, Blich T P, et al. Non-imaging, focusing heliostat[J]. *Solar Energy*, 2001, 71(3): 155-164.
- [5] Berenguel M, Rubio F R, Valverde A, et al. An artificial vision-based control system for automatic heliostat positioning offset correction in central receiver solar power plant[J]. *Solar Energy*, 2004, 76(5): 563-575.
- [6] Kribus A, Vishnevetsky I, Yogev A, et al. Closed loop control of heliostats[J]. *Energy*, 2004, 29(5-6): 905-913.
- [7] 陈维, 李戡洪. 抛物柱面聚焦的几种跟踪方式的光学性能分析 [J]. *太阳能学报*, 2003, 24(4): 477-482.
Chen Wei, Li Jianhong. Optical performance analysis for parabolic-trough focusing collector with several tracking modes [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2003, 24(4): 477-482(in Chinese).
- [8] Garcia-Martin F J, Berenguel M, Valverde L, et al. Heuristic knowledge-based heliostat field control for the optimization of the temperature distribution in a volumetric receiver[J]. *Solar Energy*, 1999, 66(5): 355-369.
- [9] Liu Deyou, Xu Chang, Wan Dingsheng, et al. Study on the integrated control system at solar power tower plants[C]. *World Solar Congress*, Beijing, China, 2007.
- [10] Aiuchi K, Yoshida K, Onozaki M, et al. Sensor-controlled heliostat with an equatorial mount[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(9): 1089-1097.
- [11] 李建英, 吕文华, 贺晓雷, 等. 一种智能型全自动太阳跟踪装置的机械设计[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(3): 330-334.
Li Jianying, Lv Wenhua, He Xiaolei, et al. Mechanical design of an intelligent automatic solar-tracking device[J]. *Transaction of solar energy*, 2003, 24(3): 330-334(in Chinese).
- [12] 关慧, 赵争鸣, 孟朔, 等. 变频调速异步电机的优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 194-199.
Guan Hun, Zhao Zhengming, Meng Shuo, et al. Optimal design for inverter-driven induction motors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7): 194-199(in Chinese).
- [13] Segal A, Epstein M. The optics of the solar tower reflector[J]. *Solar Energy*, 2000, 69(1-6): 229-241.
- [14] 郭苏, 刘德有. 考虑接受塔阴影的定日镜有效利用率计算[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(11): 1182-1187.
Guo Su, Liu Deyou. The calculation of the shadow and block efficiency of the heliostats considering tower shadows in tower SPPs [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2007, 28(11): 1182-1187(in Chinese).
- [15] 汪初冬, 赵斌. 基于 89C51 单片机的定桨距失速型风电机组软并网装置研究[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(3): 359-363.
Wang Rendong, Zhao Bin. The study about the soft cut-in device applying ATMEL 89C521 MCU on the fixed pitch wind turbine generator[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2004, 25(3): 359-363(in Chinese).
- [16] 王晓远, 宋鹏, 田亮, 等. 基于 DSP 的盘式无铁心永磁同步电动机调速系统[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(17): 138-142.
Wang Xiaoyuan, Song Peng, Tian Liang, et al. DSP based speed-regulating system for coreless axial flux permanent magnet motors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(17): 138-142(in Chinese).
- [17] 崔纳新, 张承慧, 孙丰涛. 异步电动机的效率优化快速响应控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(11): 118-123.
Cui Naxin, Zhang Chenghui, Sun Fengtao, et al. Study on efficiency optimization and high response control of induction motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(11): 118-123(in Chinese).
- [18] 王永富, 柴天佑. 一种补偿动态摩擦的自适应模式控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(2): 139-143.
Wang Yongfu, Chai Tianyou. Adaptive fuzzy control method for dynamic friction compensation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(2): 139-143(in Chinese).



郭铁铮

收稿日期: 2008-08-13。

作者简介:

郭铁铮(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为太阳能热利用技术领域, guotiezheng1983@163.com;

刘德有(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事可再生能源利用等研究领域。

(责任编辑 王剑乔)