

槽式太阳能跟踪控制系统的研制及应用

王金平¹, 王 军^{1*}, 冯 炜², 王登文³, 张耀明¹

(1. 东南大学能源与环境学院太阳能技术研究中心, 南京 210096; 2. 南瑞太阳能科技有限公司, 南京 211000;
3. 南京帕倍特太阳能有限公司, 南京 211000)

摘 要: 目前在太阳能热发电领域, 仅有槽式太阳能实现了商业发电, 但是槽式太阳能需要实时进行太阳跟踪。为了提高槽式太阳能跟踪精度, 该文研制了一种基于可编程逻辑控制器 PLC 的太阳自动跟踪系统, 并采用视日运动轨迹算法主动式跟踪策略, 计算出槽式太阳聚光器跟踪太阳的旋转角度, 并用该角度产生控制指令驱动液压油缸, 实现对南北布置东西跟踪的槽式太阳聚光器的精确太阳跟踪, 选取了 4 个典型日期分析该跟踪系统在 4 个典型日期时太阳位置的高度角、方位角、跟踪太阳的旋转角度以及聚光器的旋转角度等数据, 研究聚光器的运行特性。应用结果显示, 该跟踪控制系统计算的太阳位置算法与国际上比较先进的高精度太阳位置 SPA 计算算法之间的误差在 0.12° 以内, 角度传感器的变送误差在 0.044° 以内, 间歇跟踪驱动最大误差在 0.4° 以内, 经过现场测试整个跟踪系统的误差在 0.5° 以内。同时, 对聚光器的运行轨迹数据分析显示抛物槽式聚光器的全年最大运行速率出现在冬至日的正午时刻, 达到 $0.398^\circ/\text{min}$ 。该研究可以为抛物槽式太阳聚光器的传动机构设计提供理论依据。

关键词: 太阳能; 太阳能集热器; 跟踪; 系统; PLC; 液压驱动

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.02.007

中图分类号: TK531.1; TK531.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-02-0045-08

王金平, 王 军, 冯 炜, 等. 槽式太阳能跟踪控制系统的研制及应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 45—52.

Wang Jinping, Wang Jun, Feng Wei, et al. Development and application of sun-tracking control system for parabolic trough solar collector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 45—52. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

太阳能资源清洁无污染, 而且取之不竭用之不尽^[1-3]。在太阳能热发电领域, 仅有槽式太阳能热发电技术实现了商业化发电^[4], 聚光集热系统是槽式太阳能热发电系统的核心, 太阳跟踪精度直接影响了槽式太阳能集热器的运行效率^[5-7]。针对太阳跟踪应用技术, 国内外学者做了大量的研究, Salah Abdallah 等学者对光伏发电采用双轴太阳自动跟踪, 发电效率比固定式光伏发电效率提高 41%^[8]; 陈晓宁等学者利用太阳跟踪器实现了对太阳光谱的自动采集^[9]; Al-Soud M S 等学者研制了针对太阳灶的自动跟踪控制系统, 太阳灶跟踪太阳使集热器达到 600°C 以上^[10]; 戴飞等学者设计了一种安装有太阳能跟踪控制系统的自动跟踪式小型太阳能集热玉米果穗干燥装置, 利用该装置对玉米果穗干燥, 降低了玉米果穗的含水率^[11]。太阳跟踪控制策略有采用光电、光热传感器进行被动式

跟踪^[12-13], 也有利用视日运动轨迹进行主动跟踪^[14-16]。被动式跟踪如果传感器不能准确测量太阳位置则会造成较大的跟踪误差; 为了保证大风等恶劣天气时太阳聚光器不被大风破坏, 大型太阳聚光器跟踪控制系统还需要设计抗风载保护^[17]。

主动式跟踪需要精确计算太阳位置, Jean Meeus^[18]和美国国家能源部可再生能源实验室(NREL)^[19]公布了一种高精度太阳位置的计算算法(solar position algorithm, SPA), 此计算方法以公元 2000 年为界, 前后 1 000 a 范围内计算太阳位置的累计误差不超过 0.0003° , 高精度算法的工程应用需要复杂的计算过程, 会增加自动控制系统的计算量, 在工程应用中给计算机编程带来困难, 使程序变得尤其复杂。所以应该考虑其他在精度能够满足实际需求而且工程上也简单易行的计算算法。

槽式聚光集热器一般是南北布置东西跟踪或东西布置南北跟踪, 其特点是一维跟踪水平布置, 大型槽式太阳聚光器不仅驱动扭矩大, 而且驱动旋转角度范围广。槽式聚光器采用主动式跟踪, 其跟踪太阳的角度算法和二维双轴跟踪的跟踪角度算法有很大区别。本文针对槽式太阳能热发电的聚光器的特点设计了槽式太阳能跟踪控制系统, 采用可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)计算视日运动轨迹, 对槽式聚光器进行主动式太阳跟踪, 实现跟踪太阳不依赖于气候变化, 本文设计的槽式太阳能自动跟踪系统, 能根据风速和时间自动实现保护, 可以实现全自动, 全天候的太阳跟踪,

收稿日期: 2014-10-21 修订日期: 2015-01-12

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2012015, BE2013121); 国家电网公司塔式光热发电系统集成及控制技术项目

作者简介: 王金平, 男, 讲师, 博士生, 主要从事太阳能热利用领域相关控制技术的研究工作。南京 东南大学能源与环境学院太阳能技术研究中心, 210096。Email: maswjp@126.com

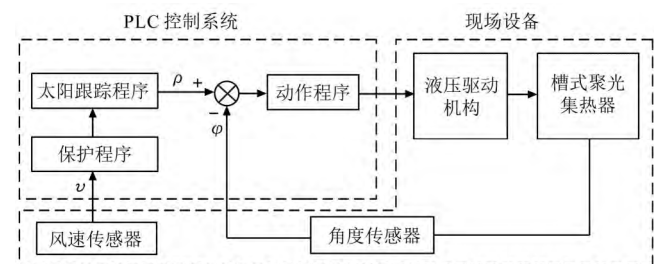
*通信作者: 王 军, 男, 副教授, 博士后, 主要从事太阳能热利用技术的研究工作。南京 东南大学能源与环境学院太阳能技术研究中心, 210096。Email: 101010980@seu.edu.cn

通过工程应用证明了其跟踪效果能够满足槽式太阳能的精度要求。

1 槽式太阳跟踪系统工作原理

1.1 槽式太阳能自动跟踪总体结构

本文研制的太阳跟踪系统总体结构如图 1 所示。跟踪控制系统由以下 5 个部分组成：PLC 控制系统、液压驱动机构、角度传感器、槽式聚光集热器、风速传感器等。风速传感器和角度传感器测量变送信号输入到可编程逻辑控制器 PLC 系统，PLC 根据相应的公式和参数，计算出太阳的实时位置，根据太阳实时位置再计算出跟踪太阳的旋转角度 ρ ，角度传感器测量到的槽式太阳能聚光器位置反馈 φ 和槽式太阳能聚光器跟踪太阳的旋转角度 ρ 进行计算偏差，在程序执行周期内若 $\rho - \varphi$ 大于 0，并且其绝对值大于设定角度阈值，系统就会产生液压驱动的动作指令使机构从东向西运行跟踪太阳；若 $\rho - \varphi$ 小于 0，并且其绝对值大于设定角度阈值，系统就会产生液压驱动的动作指令使机构从西向东运行跟踪太阳；当该偏差绝对值小于设定角度阈值，则表示聚光器已跟踪上太阳运行。风速传感器测量到环境风速 v 大于设定风速阈值则启动保护程序，使聚光器回到水平位置。系统由 PLC 控制系统和现场设备构成了一个基于聚光器角度测量和环境风速测量反馈的闭环控制系统。



注： ρ 为槽式太阳能聚光器跟踪太阳的旋转角度，(°)； φ 为槽式太阳能聚光器位置反馈角度，(°)； v 为环境风速，m/s。

Note: ρ is rotating angle of sun tracking of parabolic trough solar collector, (°); φ is position feedback angle of parabolic trough solar collector, (°); v is wind speed, m/s.

图 1 槽式太阳能聚光器跟踪系统总体结构框图

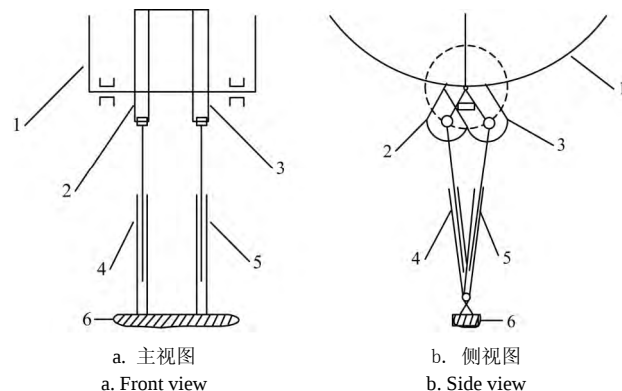
Fig.1 Overall structure diagram of sun-tracking control system for parabolic trough solar collector

1.2 槽式太阳能跟踪传动机构

槽式太阳能跟踪传动机构是跟踪控制系统的执行机构。目前，槽式太阳能跟踪传动机构大致分为 2 类：电机配减速器驱动和液压驱动。大型槽式太阳能聚光器不仅驱动扭矩大，而且驱动旋转角度范围广，电机驱动机构提供的扭矩较小，不适宜作为槽式太阳能热发电系统。液压缸推挽式驱动不仅驱动扭矩大，而且驱动旋转角度范围广，配以液压控制系统可以达到很高跟踪精度^[20]。本文设计的槽式太阳跟踪传动机构采用双液压缸推挽驱动结构形式，它由聚光器、基座、2 个传动杆以及 2 个液压油缸组成，如图 2 所示。

聚光器跟踪太阳的运动包括东极限位到西极限位的逆时针旋转及对应的顺时针旋转，抛物槽式聚光器槽口几何中心朝正东方向定义为零位（东极限位），系统由东

向西跟踪太阳逆时针方向为角度增加，系统由西向东顺时针方向为角度减少，抛物槽式聚光器槽口几何中心朝正西方向定义为 180°（西极限位），跟踪角度范围为 0~180°。系统由压力油驱动 2 个液压缸，通过控制 2 个电磁阀的启闭，从而控制进入 2 个液压缸的压力油实现聚光器东西方向的角度旋转。



1. 抛物槽式聚光器 2. 传动杆 A 3. 传动杆 B 4. 液压油缸 A 5. 液压油缸 B 6. 基座

1. Parabolic trough concentrator 2. Transmission lever A 3. Transmission lever B 4. Hydraulic cylinders A 5. Hydraulic cylinders B 6. Base

图 2 槽式太阳能聚光器跟踪传动机构结构示意图

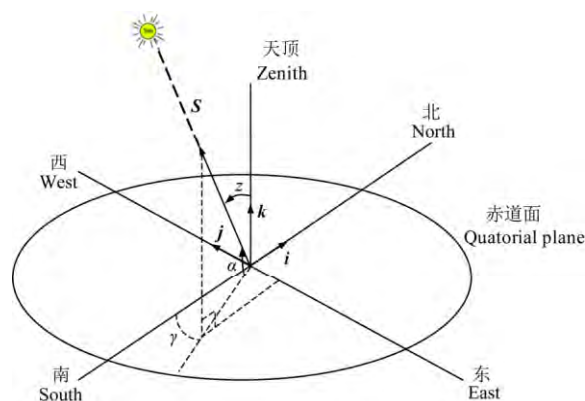
Fig.2 Structure schematic of driving mechanism of parabolic trough solar collector

2 太阳跟踪控制系统的设计

设计槽式太阳能跟踪控制系统，首先需要建立跟踪角度的算法模型。

2.1 视日运动轨迹数学模型

图 3 为太阳位置计算的地平坐标系几何模型^[21]。



注： S 为单位矢量，表示槽式太阳能聚光器所在地的太阳光线； i, j, k 分别为太阳光线投影到正北轴，正西轴，天顶轴的单位矢量； α 为太阳高度角，(°)； γ 为太阳方位角，(°)； z 为太阳天顶角，(°)。

Note: S is sun ray unit vector of parabolic trough solar concentrator location; i, j and k respectively is a unit vector of sun ray projection to north axis, west axis and zenith; α is solar altitude angle, (°); γ is solar altitude angle, (°); z is solar zenith angle, (°).

图 3 地平坐标几何模型

Fig.3 Horizon coordinate geometry model

以太阳跟踪系统所在地为原点建立的地平坐标系，则 S 可表示为：

$$S = \sin \alpha i + \cos \alpha \cos \gamma j - \cos \alpha \sin \gamma k \quad (1)$$

由式 (1) 可以看出，在地平坐标系中，由太阳高度

角和方位角就可以确定太阳在地球中的位置。在时角坐标系里，太阳高度角和方位角的计算公式如下^[21]：

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta_s \sin L + \cos \delta_s \cos L \cos \omega) \quad (2)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \delta_s \sin L \cos \omega - \sin \delta_s \cos L}{\cos \alpha} \right) \quad (3)$$

式中： δ_s 为太阳赤纬角，(°)； L 为当地经度，(°)； ω 为时角，(°)。

赤纬角计算使用文献[22]的计算公式，该式具有较高的精度，计算如下：

$$\delta_s = 0.3723 + 23.2567 \sin \theta + 0.1149 \sin 2\theta - 0.1712 \sin 3\theta - 0.758 \cos \theta + 0.3656 \cos 2\theta + 0.0201 \cos 3\theta \quad (4)$$

式中： θ 为日角，计算式如下：

$$\theta = \frac{2\pi(N - N_0)}{365.2422} \quad (5)$$

式中： N 为积日，无量纲数； N_0 为年校正系数，无量纲数。

所谓积日，就是日期在年内的顺序号，例如，1 月 1 日其积日为 1，平年 12 月 31 日的积日为 365，闰年则为 366。

年校正系数的计算式如下：

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422 \times (Y - 1985) - \text{INT}[(Y - 1985) / 4] \quad (6)$$

式中： Y 为测量年份； INT 为取整函数。

太阳时角是根据 24 h 的标称时间太阳绕地球转动 360°，其计算如下^[23]：

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

式中： t_s 为当地真太阳时，h。

当地真太阳时的计算式为：

$$t_s = t_d + t_e \quad (8)$$

式中： t_d 为地方时，h； t_e 为时差，h。

时差 t_e 的计算式为：

$$t_e = 0.0028 - 1.9857 \sin \theta + 9.9059 \sin 2\theta - 7.0924 \cos \theta - 0.6882 \cos 2\theta \quad (9)$$

地方时的计算式为：

$$t_d = t_{loc} \pm (120 - JD) \times \frac{1}{15} \quad (10)$$

式中： t_{loc} 为当地时间，此处取北京时间，h； JD 为当地的经度与北京时间的经度差，(°)。在式 (10) 中，西半球地点取正号，东半球地点取负号。

2.2 槽式太阳能聚光器跟踪角度确定

槽式太阳能聚光器有 2 种布置方式，分别是南北布置东西跟踪和东西布置南北跟踪，如图 4 所示。

对于南北布置东西跟踪形式槽式太阳能聚光器，其跟踪太阳的旋转角度，用太阳高度角和方位角表示^[24]：

$$\rho = \tan^{-1} \left[\left(\frac{\sin(\beta - \gamma)}{\tan \alpha} \right) \right] \quad (11)$$

式中： ρ 为槽式太阳能聚光器跟踪角度，(°)； β 为聚光器几何中心与正南北轴的夹角，(°)。本文聚光器采用南北

布置正南安装，其 $\beta=0$ 。只要确定槽式聚光器安装所在的经度和纬度，由式 (2) ~ (11)，即可得到当地时间槽式太阳能聚光器的跟踪角度 ρ 。

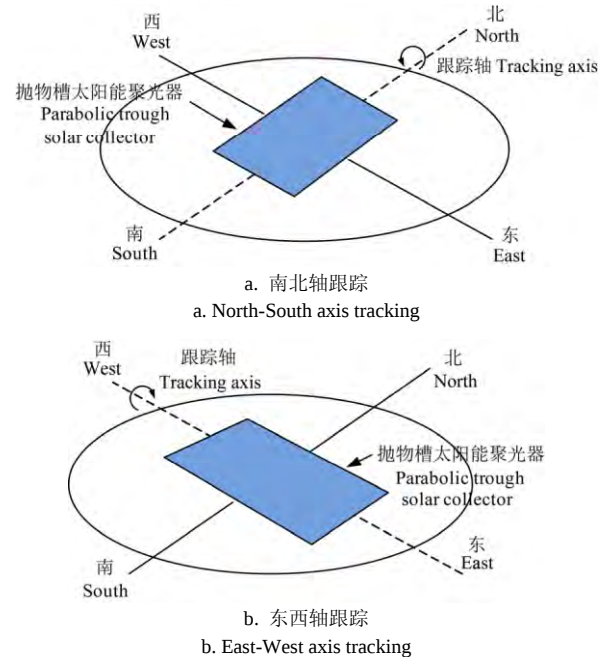


图 4 槽式太阳能聚光器跟踪模式

Fig.4 Tracking mode of parabolic trough solar collectors

2.3 PLC 控制程序流程

PLC 控制程序流程如图 5 所示。PLC 软件要完成初始化、数据采集、数据处理、液压系统驱动控制和数据通信等工作。首先，系统初始化，主要设置系统时间和系统参数，包括当地经纬度、时区、跟踪有效太阳角度、间隙式跟踪的间隔时间等参数，为了减少电磁阀的动作时间，程序采取每 1 min 执行一次，执行周期设置为 20 s。程序首先判断系统的控制方式，如果在自动模式下，程序执行自动控制的逻辑程序，若不在自动模式则系统进入手动模式。在遇到大风等恶劣天气为了保护槽式集热装置，系统设计了风速保护。当风速传感器检测到风等级大于 8 级（8 级风 17.2~20.7 m/s）时，向 PLC 发送中断请求，程序进入中断子程序，并将聚光器快速回到保护位置，将聚光器快速返回到水平位置（旋转角 $\rho=90^\circ$ ），等待下一步指令。当风力减弱后，程序跳出中断子程序，继续执行太阳跟踪程序，使聚光集热器继续回到工作位置，继续跟踪。PLC 程序在读取当地时间、经度与纬度等数据后，根据上述数学公式计算槽式太阳能聚光器的跟踪角度并与角度传感器测量的抛物槽式聚光器的当前角度进行比较，在两者误差大于 0.4° 时程序执行跟踪指令。系统的工作时间设定在 05:00—20:00。控制器的时钟芯片每天 05:00 唤醒控制器，系统开始工作，等到日落时，PLC 发出指令，使聚热装置快速运动到保护位置，等待次日启动。

3 槽式太阳能跟踪控制系统的应用及效果

应用本文研制的槽式太阳能跟踪控制系统驱动槽式太阳能集热器，以分析槽式太阳能聚光器在不同季节的

运行特性和跟踪效果；通过实际应用的数据分析跟踪误差，并对跟踪控制程序的执行间隔时间进行设定以修正误差和提高跟踪系统的精度。

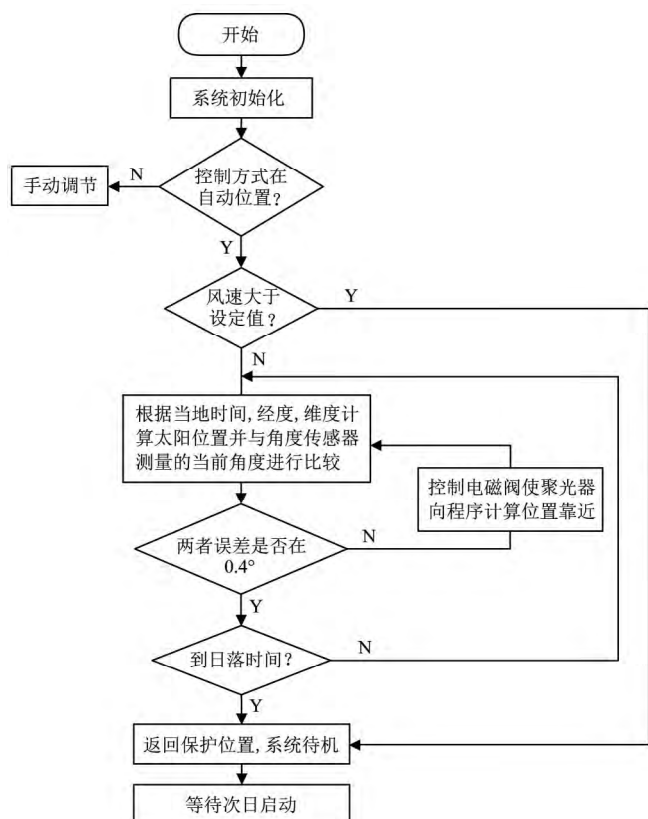


图5 PLC控制逻辑流程图

Fig.5 Flow chart of PLC control logic

3.1 应用

本文设计的槽式太阳能聚光集热系统的实物如图6所示，抛物槽长度为50 m，开口宽度为5.74 m。安装在南京市江宁区横溪镇（118.4629°E，31.453°N），安装采用图5 a的东西水平布置南北轴跟踪模式。选取2013年中4个典型日期进行太阳跟踪的应用试验，这4个典型日期分别是：春分日（2013年3月20日）、夏至日（2013年6月21日）、秋分日（2013年9月23日）以及冬至日（2013年12月22日）。在4个典型日期时记录PLC控制系统计算的太阳高度角、方位角、聚光器的跟踪角度以及聚光器测量角度的变化数据。



1. 真空集热管 2. 抛物槽式聚光镜 3. PLC控制柜
1. Evacuated collector tube 2. Parabolic trough concentrating mirror 3. PLC control cabinet

图6 槽式太阳集热器实物图

Fig.6 Physical diagram of parabolic trough solar collectors

3.2 运行效果

3.2.1 跟踪控制系统计算的太阳角度

应用本文研制的跟踪控制系统计算太阳角度，以分析槽式太阳能聚光器的运行特性。试验测量到的4个典型日期太阳高度角和方位角变化曲线如图7所示。太阳高度角变化以正午时分分为分界点，正午时刻高度角达到最大值，在每天的正午后需要反相，并在夏至日转角范围最大，夏至日的正午时刻的高度角为81.03°，而冬至日正午时刻的高度角为34.89°，两者相差46.14°。在正午之前高度角的变化呈递增趋势，正午过后呈递减趋势，如图7a所示；本文的方位角的计算采用0~360°量程计算，方位角在正午时刻达到180°，方位角的变化范围(日出到日落)在夏至日达到全年的最大值，为236.08°，冬至日方位角的变化范围则全年的最小值，为124.92°，如图7b所示。从跟踪控制系统计算的太阳高度角和方位角的变化数据分析可以看出太阳的运行轨迹变化比较复杂，每天的运动规律都不一致，因此太阳跟踪控制需要按非线性控制系统进行设计。

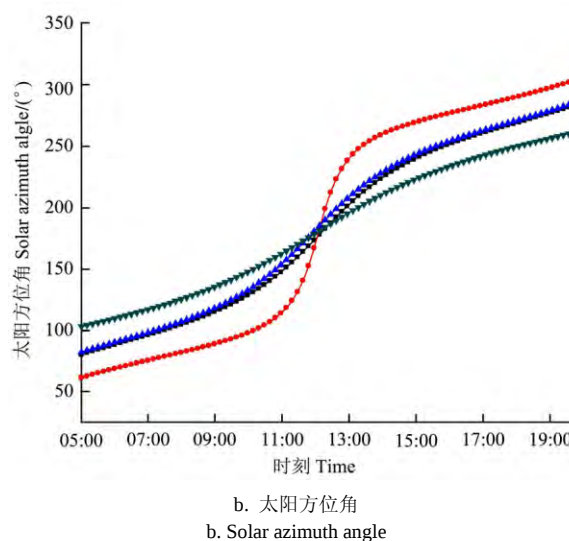
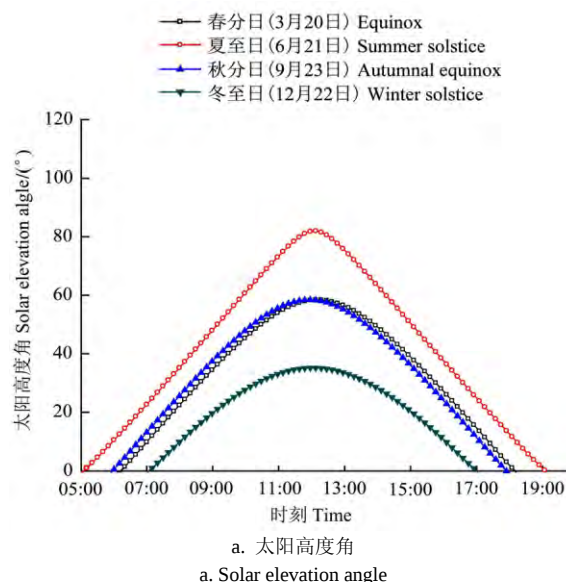


图7 太阳高度角和方位角变化曲线

Fig.7 Curve of solar elevation angle and sun azimuth angle

3.2.2 槽式太阳能聚光器跟踪太阳效果

应用本文研制的跟踪控制系统驱动槽式太阳能集热器, 分析其跟踪太阳的规律。图8为抛物槽式聚光器跟踪太阳的运行数据曲线, 图8a为聚光器旋转角度速率曲线, 图8b为聚光器运行轨迹曲线。可以看出4个典型日的聚光器跟踪角度相差比较大, 槽式太阳能跟踪系统的运动动力学特性比较复杂, 每天的控制规律都不一致, 且具有很强的非线性, 系统在夏至日运行的轨迹范围最大, 冬至日运行轨迹范围最小, 跟踪系统的跟踪角大约在 $0\sim 180^\circ$ 范围内运行。由图8b可以看出冬至日虽然运行轨迹范围最小, 但聚光器运行速率最快, 峰值达到 $0.398^\circ/\text{min}$ 。而夏至日虽然运行轨迹范围最大, 但聚光器运行速率最慢, 峰值为 $0.232^\circ/\text{min}$, 夏至日和冬至日运行速率差约 $0.166^\circ/\text{min}$, 而春分和秋分日运行速率变化不大, 每天正午时刻为槽式太阳能聚光器跟踪太阳运行最快的时刻。

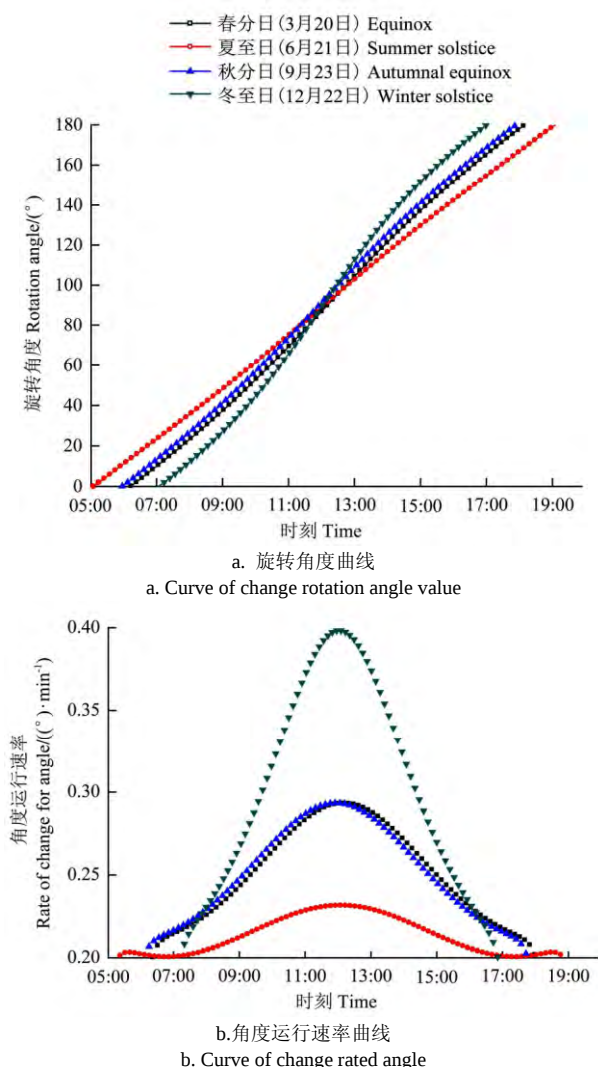


图8 抛物槽式太阳能聚光器角度变化曲线

Fig.8 Change curve of angle for parabolic trough solar collectors

太阳能热发电应用的抛物槽式聚光集热器是一个低速、大转动惯量的系统, 对运行速率的分析可以计算出传动系统转轴的最大转矩, 为驱动的机械设计提供理论依据。由分析可以看出, 对抛物槽式聚光集热器而言,

冬至日的正午前后聚光器的转角加速度最大, 设计时应该以该时间点为计算依据。

3.2.3 跟踪控制系统对跟踪误差修正

槽式太阳能跟踪系统的跟踪误差影响集热器的运行效率, 并且跟踪误差直接决定了太阳跟踪控制系统是否满足工程应用。跟踪误差主要来源于跟踪控制系统误差、机械部分传动误差等, 机械部分传动误差可以通过跟踪控制方式加以修正, 而对采用视日运动轨迹进行太阳跟踪的控制系统, 其控制系统误差主要是太阳位置的计算误差^[25-26]。

机械部分转动误差主要包含角度传感器的测量变送误差和传动机构的运动误差。本系统的角度传感器选用的是绝对值旋转编码器, 该编码器输出12位格雷码, 旋转一圈的分辨角为 $360^\circ/4096=0.088^\circ$, 对于本系统聚光器在 $0\sim 180^\circ$ 范围内运行, 测量变送误差最大为 0.044° 。驱动机构的传动误差主要取决于驱动机构的实现形式, 太阳跟踪的传动机构可以采用连续跟踪和间歇跟踪两种基本方法^[27]。传动机构的实现形式不同, 跟踪控制策略需要作相应调整以提高跟踪精度。本文采用间歇跟踪方法。连续跟踪方法聚光器的跟踪角按照太阳位置变化规律随时间连续调节以跟随太阳运行轨迹的变化的控制方法, 跟踪系统的机械转动部分需要设计非常大的减速比。此外, 连续跟踪意味着跟踪机构在不间断的运动, 将消耗大量的电能, 违背了太阳能利用的目的。本系统采用的间歇跟踪方法, 即每隔一段时间间隔后, 运动轴快速调整一次跟踪角, 使聚光器的转角与其由于停顿导致落后于太阳运行的角度相等。在运行间隔时间以外, 聚光器的驱动机构固定不工作。采用间歇跟踪方法, 不仅可以简化系统控制, 避免庞大的减速系统, 而且可以减少液压机构的动作频率, 增加系统的运行寿命, 降低跟踪运动系统本身的能耗。但该方法不可避免的要牺牲系统的跟踪精度。跟踪程序的间隔时间直接决定了间歇跟踪方法的跟踪误差, 本系统设计的间隔时间为1min, 按前面分析冬至日正午时刻的聚光器运行速率为全年最大峰值, 为 $0.398^\circ/\text{min}$, 则该方法最大间隔误差既为 0.398° 。

槽式太阳能跟踪系统的另外一个误差是聚光器的跟踪角度的计算误差, 采用前述视日运动轨迹数学模型计算出的太阳高度角和方位角直接决定了太阳跟踪角的精度, SPA算法具有非常高的计算精度。图9为本系统PLC计算出的太阳跟踪角、聚光器测量角度和采用SPA算法计算的角度对比曲线。从图中可以直观地看出聚光器测量角度变化趋势与设计的跟踪策略是一致的。SPA算法计算的角度和太阳跟踪角输出的最大偏差为 0.12° , 而SPA算法的1000年的计算误差在 0.0003° 以内, 所以本系统的视日轨迹的计算误差可控制在 0.13° 以内。本系统的角度传感器的采样时间间隔为5s, 所以实际跟踪曲线角位变化值在时间点上并不准确, 在某些点上存在有一定的时间延迟, 但跟踪曲线总体上体现了间歇式跟踪的规律。从数据分析来看, 控制器的角度输出和聚光器测量角度的最大偏差在 0.4° 以内, 聚光器的测量角度和SPA

计算角度误差在 0.5° 以内,说明采用程序采用 1 min 的运行间隔时间是合理的。

3.2.4 与太阳直接辐表跟踪太阳效果的比较

测量太阳直接辐射需要将太阳辐射表准确跟踪太阳,直接辐射表可以反应太阳跟踪的精度。太阳直接辐射表不能对准太阳时,其测量值不能反应太阳总辐射值的变化趋势^[28-29]。将直接辐射表安装在本文研制的太阳跟踪控制系统中,进行太阳跟踪测取太阳直接辐射数据。将采集 7 h 的太阳总辐射和直接辐射数据进行对比,如图 10 所示。由图 10 可知,其变化曲线能进一步说明安装在聚光器上的直接辐射仪变化与总辐照趋势一致,应用本文研制的太阳跟踪控制系统能使直接辐射表精确跟踪太阳。

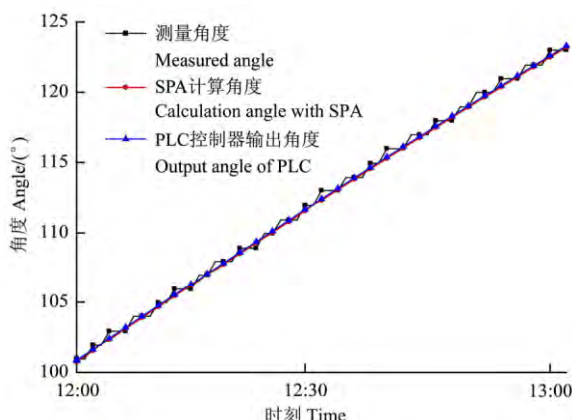


图 9 角度对比曲线

Fig.9 Comparative curve of angle value

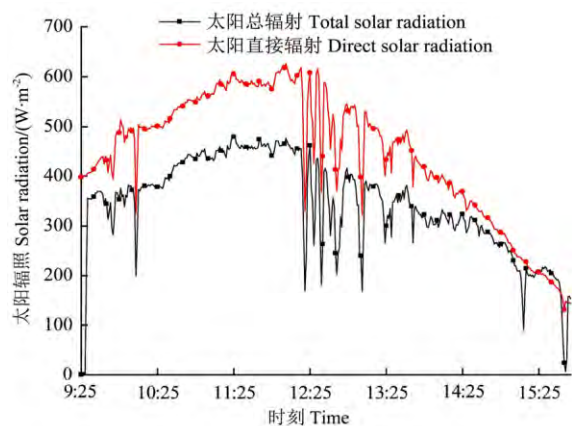


图 10 太阳辐照变化曲线

Fig.10 Curve of solar irradiance

4 结论

本文设计了一种基于 PLC 的槽式太阳跟踪控制系统,进行了应用并分析了应用效果。该槽式太阳能聚光器采用双液压缸推挽式驱动,驱动旋转角度范围达到 $0 \sim 180^\circ$ 。跟踪太阳的控制策略采用视日运动轨迹主动式跟踪,采用一种比较简单的太阳位置计算算法实现了槽式太阳集热器的精确太阳跟踪,控制器不受外界天气和光电传感器影响。通过 4 个典型日期的实际运行效果分析,结果表明,抛物槽式聚光器的全年最大运行速率出现在冬至日的正午时刻,达到 $0.398^\circ/\text{min}$,该研究结果可为抛

物槽式太阳能聚光器驱动的机械传动设计提供理论依据。本文设计的跟踪液压驱动的运行采用间歇跟踪驱动方式,分析结果表明最大间歇误差在 0.4° 以内,采用的太阳位置的计算方法与 SPA 算法的误差在 0.12° 以内,控制器的角度输出和聚光器测量角度的最大偏差在 0.4° 以内,聚光器的测量角度和 SPA 计算角度误差在 0.5° 以内。在遇到大风等恶劣天气时,装置能快速返回到保护位置。该装置具有成本低、跟踪精度较高、便于自动控制、结构简单等特点,是适用于槽式太阳能光热系统的跟踪效果较好的一种跟踪控制方式,具有较高的实用性和广阔的发展前景。

[参 考 文 献]

- [1] 孙玉芳,李景明,刘耕,等.国内外可再生能源产业政策比较分析[J].农业工程学报,2006,22(增刊1):45—47. Sun Yufang, Li Jingming, Liu Geng, et al. Comparative analysis on renewable energy development policies in China and other countries[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(Supp.1): 45—47. (in Chinese with English abstract)
- [2] 文韬,洪添胜,李震,等.太阳能硅光电池最大功率点跟踪算法的仿真及试验[J].农业工程学报,2012,28(1):196—201. Wen Tao, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Test and simulation of solar silicon battery tracking algorithm based on maximum power point[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 196—201. (in Chinese with English abstract)
- [3] Sarsavadia P N. Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion[J]. Renewable Energy, 2007, 32: 2529—2547.
- [4] 张耀明.太阳能热发电技术[J].高科技与产业化,2009(7):28—30. Zhang Yaoming. Solar thermal power technology[J]. High-technology and Industrialization, 2009(7): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [5] Soteris A Kalogirou. Design and construction of a one-axis sun-tracking system[J]. Solar Energy, 1997, 57(6): 465—469.
- [6] 张莹,李明,季旭,等.槽式太阳能系统聚光镜面参数对聚光特性的影响研究[J].云南师范大学学报:自然科学版,2013,33(4):14—19. Zhang Ying, Li Ming, Ji Xu, et al. The impact of the condenser mirror's parameters of solar trough reflector on the concentrating characteristic[J]. Journal of Yunnan Normal University: Natural Sciences Edition, 2013, 33(4): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [7] Forristall Russell. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [8] Abdallah S, Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control[J]. Energy conversion and management, 2004, 45(11): 1931—1939.

- [9] 陈晓宁, 张林, 刘建国, 等. 基于太阳跟踪的自动光谱采集系统[J]. 太阳能学报, 2013, 34(5): 800—804.
Chen Xiaoning, Zhang Lin, Liu Jianguo, et al. Research and implement of the automic spectrum collecting system based on the suntracking[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(5): 800—804. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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.
- [11] 戴飞, 张锋伟, 韩正晟, 等. 自动跟踪式小型太阳能集热玉米果穗干燥装置设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 189—193.
Dai Fei, Zhang Fengwei, Han Zhengsheng, et al. Design of small autotracking solar collector drier for maize ears[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 189—193. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王林军, 许立晓, 邵磊, 等. 碟式太阳能自动跟踪系统传动机构的误差分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 63—69.
Wang Linjun, Xu Lixiao, Shao Lei, et al. Errors analysis of transmission mechanism of dish solar auto-tracking system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 63—69. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱方园, 韩满林, 丰济济. 太阳能发电用太阳跟踪器的设计[J]. 控制工程, 2009, 16(增刊4): 109—111.
Zhu Fangyuan, Han Manling, Feng Jiji. Design of sun tracker used on solar battery[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(Supp.4): 109—111. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郑硕, 李明滨, 尹东文, 等. 基于 COSMOSMotion 太阳能跟踪凸轮机构的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 43—46.
Zheng Shuo, Li Mingbin, Yin Dongwen, et al. Design of cam mechanism of solar tracking based on COSMOSMotion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [15] 窦伟, 许洪华, 李晶. 跟踪式光伏发电系统研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(2): 169—173.
Dou Wei, Xu Honghua, Li Jing. Analysis of solar PV tracking system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(2): 169—173. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马健, 向平. 高精度太阳位置算法及在太阳能发电中的应用[J]. 水电能源科学, 2008, 26(2): 201—204.
Ma Jian, Xiang Ping. High precision computation for sun position and its application in solar power generation[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(2): 201—204. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张起勋, 于海业. 太阳自动跟踪系统机构静力学及脉动风模拟分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 137—141.
Zhang Qixun, Yu Haiye. Analysis of statics of solar auto-tracking system and simulation of fluctuating wind[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 137—141. (in Chinese with English abstract)
- [18] JeanMeeus. Astronomical Algorithms[M]. Inc., Richmond, Virginia, USA. Willmann-Bel, 1998.
- [19] Reda I, Andreas A. Solar Positon Algorithm for Solar Radiation Applications[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [20] 罗馨茹, 于勇, 俞竹青. 槽式太阳能聚光器太阳跟踪机构设计[J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2012, 24(3): 57—60.
Luo Xinru, Yu Yong, Yu Zhuqing. Design of sun tracking mechanism for solar parabolic concentrator[J]. Jouranl of Changzhou University: Natuaral Science Edition, 2012, 24(3): 57—60. (in Chinese with English abstract)
- [21] Stine W B, Harrigan R W. Solar Energy Fundamentals and Design[M]. John Wiley & Sons Inc, USA, 1985: 110—111.
- [22] 王炳忠, 刘庚山. 日射观测中常用天文参数的再计算[J]. 太阳能学报, 1991, 12(1): 27—32.
Wang Bingzhong, Liu Gengshan. Improvement in the astronomical parameters computation for solar radiation observation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1991, 12(1): 27—32. (in Chinese with English abstract)
- [23] Goswami D Y, Kreith F, Kreider J F, et al. Principles of Solar Engineering. second ed[M]. Taylor & Francis, Philadelphia, PA, 2000.
- [24] Marion W F, Dobos A P. Rotation Angle for the Optimum Tracking of One-Axis Trackers[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [25] Thorsten Stuetzle, Nathan Blair, John W Mitchell, et al. Automatic control of a 30 MWe SEGSVI parabolic trough plant[J]. Solar Energy, 2004, 76(3): 187—193.
- [26] Meaburn A, Hughes F M. A simple predictive controller for use on large scale arrays of parabolic trough collectors[J]. Solar Energy, 1996, 56(6): 583—595.
- [27] 尹丹. 槽式太阳能热发电装置跟踪控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Yin Dan. Study on Sun Tracking System for Tough Thermal Power Generatio[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨东军, 方伟, 邱红, 等. 太阳辐射的在轨监测和定标[J]. 发光学报, 2010, 31(5): 676—681.
Yang Dongjun, Fang Wei, Qiu Hong, et al. On-orbit data calibration of FY-3A solar irradiance monitor[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2010, 31(5): 676—681. (in Chinese with English abstract)
- [29] Wang Hongrui, Fang Wei. Solar irradiance absolute radiometer with ability of automatic solar tracking[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 252—258.

Development and application of sun-tracking control system for parabolic trough solar collector

Wang Jinping¹, Wang Jun^{1*}, Feng Wei², Wang Dengwen³, Zhang Yaoming¹

(1. Solar Energy Technology Research Center, College of Energy & Environment Engineering, Southeast University,

Nanjing 210096, China; 2. Solar Energy Technology Co., Ltd., NARI Group Company, Nanjing 211000, China;

3. NanJin Paruote Solar Energy Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

Abstract: Concentrating Solar Power (CSP) systems use lenses or mirrors and tracking systems to focus a large area of sunlight into a small beam. Heat transfer fluid is heated by sun rays through the solar concentrator, then used as a heat source for a conventional power plant. A wide range of concentrating technologies has existed; the most developed are parabolic trough collector (PTC), linear fresnel reflector system (LF), power tower, and dish/engine system (DE). Parabolic trough collector is considered as one of the most mature applications of solar energy in these four technologies, which makes it worth developing. Sun-tracking system plays an important role in the development of solar energy applications, especially for the high solar concentration systems that directly convert the solar energy into thermal or electrical energy. High accuracy of sun-tracking is required to ensure that the solar collector is capable of harnessing the maximum solar energy throughout the day. Compared to fixed systems, power output of single-axis and dual-axis tracking systems can increase by 25% and 41% respectively under the same condition. It is clear that an accurate sun-tracking control system can make solar collectors receive more solar radiation energy to improve the solar energy utilization. A good sun-tracking system must be reliable and able to track the sun at the right angle even in the periods of cloud cover. Although the tracking system is more complex and costs higher than the fixed system, increasing the annual output power can reduce cost effectively. As for photoelectric tracking mode, a sun position sensor is used to provide feedback signals to judge where the sun is, but they don't work on cloudy days because of the lower sensitivity. The stability of the solar tracking system is a key factor to obtain the maximum sunlight from parabolic trough collector. In order to improve tracking stability and accuracy of the parabolic trough collector sun-tracking control system, this paper chose the more reliable hydraulic drive mechanism to match the system and mainly focused on the design of sun-tracking control system and analysis of operational data from the parabolic trough collector sun-tracking system. Based on the existed working platform of parabolic trough collector system with a length of 50 meters, this paper developed a sun-tracking control system for parabolic trough solar collector. Based on programmable logic controller (PLC), active control mode on the trajectory of the sun was adopted, which could calculate the rotation angle of the parabolic trough solar collector and control commands to drive the hydraulic cylinder to achieve real-time tracking of the sun. The system's basic operating principle, design of sun-tracking, rotation angle algorithm of parabolic trough solar collector and PLC's programs have been analyzed. Experiments were conducted in the 4 typical dates (March 20, June 21, September 23, and December 22, in 2013). The analytical result showed that sun-tracking errors of parabolic trough solar collector were nearly 0.5° . Compared to more accurate SPA (solar position algorithm) algorithm, calculation error of algorithm to calculate the position of the sun was within 0.12° . The maximum error of intermittent operation tracking mode was within 0.398° . The maximum operating speed of parabolic trough collector in the year appeared at noon on the winter solstice, the maximum operating speed was $0.398^\circ/\text{min}$, and transmission error of an angle sensor was at 0.044° or less. This study may provide the theoretical basis for mechanical transmission design of parabolic trough collector.

Key words: solar energy; solar collectors; tracking; systems; programmable logic controllers; hydraulic drive