

文章编号 1004-924X(2016)增-0415-06

基于 STM32 的太阳自动追踪系统

张玉燕^{1,2*}, 刘 勇^{1,2}, 温银堂³, 任天昕^{1,2}

- (1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 燕山大学 科学技术学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为提高太阳能电池板的光电转换效率,研究了太阳追踪技术,设计一种基于 STM32 控制器的太阳自动追踪系统。针对太阳方位角与高度角运动范围的差异,设计六光敏区的传感器模块作为光电检测器,保证宽范围内太阳位置的检测。提出变比例因子的比例控制算法,用于快速跟踪太阳位置,将粗调模式和细调模式结合,进行大角度太阳位置跟踪。将光电检测追踪算法和视日运动轨迹追踪算法结合,实现晴朗天气条件下和多云天气条件下对太阳空间位置的实时追踪,控制太阳能电池板保持在最优受光位置,实现提高输出功率的目标。实验结果表明,设计的系统可以实现精确的太阳追踪,误差小于 1°。系统灵敏度高,追踪性能稳定,提高了太阳能电池板的光电转换效率。

关键词:光电转换效率;太阳追踪;六光敏区;光电检测追踪;视日运动轨迹追踪

中图分类号: 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162413.0415

Automatic sun tracking system based on STM32

ZHANG Yu-yan^{1,2*}, LIU Yong^{1,2}, WEN Yin-tang³, REN Tian-xin^{1,2}

- (1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
 2. Key Lab of Measurement Technology and Instrumentation of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004, China;
 3. School of Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)
- * Corresponding author, E-mail: yzhang@ysu.edu.cn

Abstract: To improve photoelectric conversion efficiency of solar panel, a research is conducted on the solar tracking technology and a solar auto-tracking system based on STM32 controller is designed. Considering the difference in solar movement range in the azimuth angle and altitude angle, design a sensor module in the six photosensitive areas as the photoelectric detector to ensure solar position detection in a wide range; put forward the ratio control algorithm for variable scale factors to fast detect the solar position, and combine coarse tuning mode with fine tuning mode to achieve large-angle solar position tracking; combine the photoelectric detection tracking algorithm with the solar movement tracking algorithm to achieve real-time tracking of solar position in fine weather and cloudy weather, control the solar panel in the optimal lighting position, and improve the output power. It indicates that the system designed can achieve accurate solar tracking, with an error lower than 1°. The sys-

收稿日期:2016-06-10;修订日期:2016-07-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61403333)

tem, with high sensitivity and stable tracking performance, helps improve the photoelectric conversion efficiency of solar panel.

Key words: photoelectric conversion efficiency; solar tracking; six photosensitive areas; photoelectric detection and tracking; sun movement tracking

1 引言

太阳能是一种清洁、无污染的新能源,被广泛应用于人类的生产与生活,太阳辐射是地球的重要外部能源^[1]。研究表明,当太阳光线垂直照射光感平面时,太阳能电池板可获得更高的太阳能利用率^[2]。因此研发太阳追踪装置来提高太阳能光伏发电效率,具有非常重要的理论意义和实际应用价值。

近年来,太阳追踪装置得到了广泛的关注与研究。在跟踪装置方面,与传统的固定装置相比,单轴太阳跟踪器与双轴太阳跟踪器拥有更好的前景^[3]。单轴装置结构简单^[4-5],但追踪精度不高。双轴装置拥有更高追踪精度,因而更利于提高太阳能电池光电转换效率^[6],但控制算法相对复杂。在控制策略上,主要有主动追踪方式和被动追踪方式。主动追踪是一种开环的追踪方法,根据预先计算好的角度进行主动的追踪,装置无反馈,因此没有纠错能力。被动追踪方式通过传感器获取外部信息,系统根据外部反馈实时调整调整角度,进行跟踪。但这种方法依赖性太强,仅限于晴天使用^[7]。还有许多国内外研究人员做了大量研究工作^[8-12]。文献[13]采用模糊控制算法与 PID 算法相结合,控制装置进行太阳追踪,可显著提高太阳能利用率。文献[14]通过对 SPA、PSA 和 Michalsky 算法的对比,提出以程序粗跟踪与传感器精确跟踪相结合的方法,实现太阳追踪。文献[15]搭建了光束表征系统,利用相机采集反光板上太阳图像,通过图像处理算法计算太阳位置并实现跟踪。文献[16]使用利用质心提取算法去除太阳图像中的雾霾,提高太阳跟踪器在雾霾天气中的运行精度。

本文提出一种基于 STM32 的太阳自动追踪系统。根据太阳运动规律设计制作了高效低成本的六光敏区传感器模块,实现大角度太阳检测。采用双轴追踪装置,根据天气情况,可自动切换两

种追踪方式并实现精确稳定追踪,其中光电检测追踪方法实现晴朗天气的追踪,视日运动轨迹追踪算法实现多云天气的追踪。

2 测量系统方案

太阳自动追踪系统的总体构成如图 1 所示,主要由 5 部分组成:(1)光电传感器模块,主要由硅光电池传感器和信号转换调理电路组成。传感器采集太阳光光照度信号,传入控制器进行分析处理。(2)微控制器模块。采用 ST 公司生产的 STM32F103ZET6 控制器进行传感器数据采集,追踪算法运算并发出控制命令。(3)时钟模块。系统实时时钟辅助系统运行,为视日运动轨迹算法提供时间参数。(4)机械执行机构。根据控制器脉冲命令,调整角度。(5)触摸显示屏。可实现人机交互,显示系统参数和时间信息,触摸屏输入控制命令。

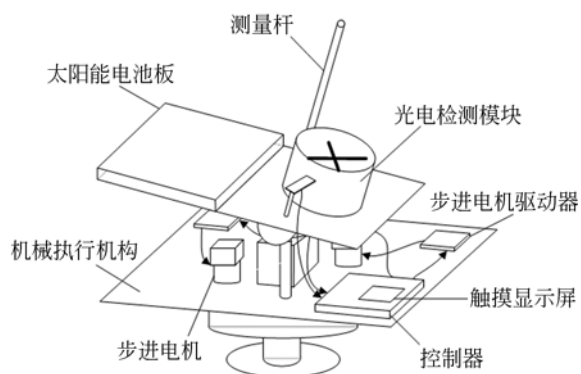


图 1 系统总体构成示意图

Fig. 1 Sketch map of system

在视日运动轨迹追踪方法下,系统运行软件算法计算当前时刻太阳的高度角与方位角,发出控制信号驱动机械执行机构实现太阳追踪。在光电检测追踪方法下,系统通过光电传感器模块获取光照信息,分析角度偏差,并控制机械执行机构减小角度偏差。触摸显示屏可通过输入命令实现

两种追踪方法的切换,并对系统的运行状态进行实时监控。太阳自动追踪装置对追踪精度要求较高。为了提高整体装置的灵活性,采用双轴云台用做角度调整机构。云台的两个自由度控制高度角和方位角的调整。传感器模块布局新颖,用于精确检测太阳位置。系统软件与硬件相结合,实现太阳自动追踪。

3 光电传感器布局

为了获取精确的太阳位置信息,提出了一种 6 光敏区的传感器布局方式,传感器模块工作在粗调和细调相结合的模式下,如图 2 所示。其中 1、2、3、4 位置处各放置一个 SP-3ML 型光电传感器,整个电路板放置在一个不透光的圆筒里,圆筒高度和直径可根据电路板尺寸和光电传感器的光敏面积计算确定,可以有效调整传感器接收光线的入射角度。圆筒内部 2 个不透光的挡板将受光区域分割成 4 个扇形部分分别进行 4 个方向的太阳光的精确检测。5、6 位置处采用 BPW34 型传感器,两个传感器电路板分别固定在圆筒外侧进行东西方向粗略检测。这种 6 光敏区布局充分考虑了太阳在东、西方向与南、北方向上的运动幅度差异。东西方向上的二次检测方法对太阳光入射方位角进行检测,扩大了传感器模块的检测范围,提高系统环境适应性。

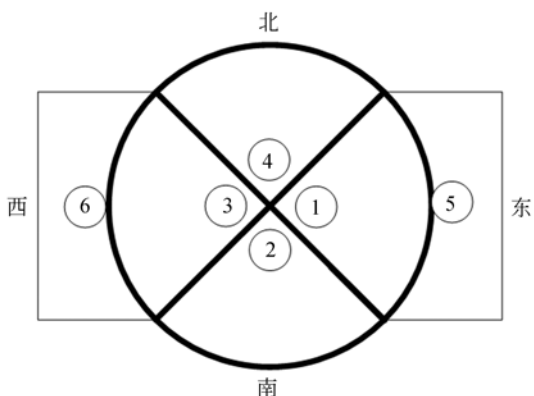


图 2 传感器模块布局
Fig. 2 Layout of sensor module

在有光线照射到传感器模块上时,传感器采集太阳光光照度信号,如图 3 所示。当太阳光入射角很大时,图中光线 a 入射到达图中 C 处位置,此时圆环内部 1、2、3、4 号传感器都不能接收

到直射的太阳光,系统工作在粗调状态。外围的 5、6 号传感器采集有效光照信号,系统通过对比分析数据,发出控制信号向减小入射角的方向进行固定大角度调整。通过调整使太阳入射角逐渐减小,当光线到达图中 B 处位置,此时光线可以直接照射到圆筒内部的传感器光敏面,传感器采集的信号值明显增大,通过设定一个合理的阈值,使系统转为细调工作状态。在细调工作状态下,系统采集圆筒内部传感器的信号,对比分析 4 个方向上的传感器数据并发出控制信号。机械执行机构先调整方位角,然后调整高度角,通过这样的循环调整,不断减小角度偏差,由于信号采集的不稳定性,信号误差不可能完全消除,设定一个误差限,当信号误差小于误差限时,视为跟踪完成,整个系统完成一次精确跟踪。

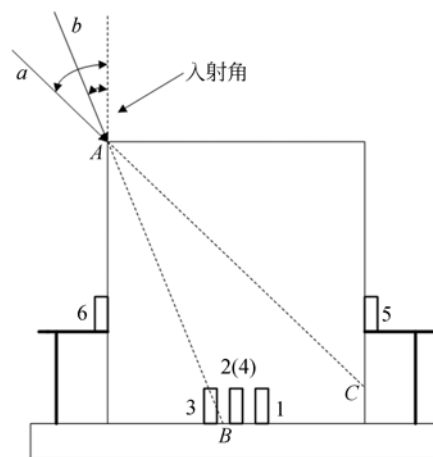


图 3 传感器光照示意图
Fig. 3 Schematic diagram of sensor light

4 追踪算法

采用光电检测追踪与视日运动轨迹追踪算法相结合的方式。程序在执行过程中会先从底层获取有效数据,包括传感器信号和系统日期等。根据传感器信号,系统判断当前天气,在晴朗的天气下,系统采用光电检测追踪算法,在多云天气采用视日运动轨迹算法。最后单片机发出控制信号,机械执行机构调整角度实现对于太阳的自动追踪。系统软件如图 4 所示。

STM32 微控制器运行 72 MHz 的时钟主频,运算速度快,反应灵敏。对于不同的天气系统自动选取不同的跟踪策略,提高系统的适应性。

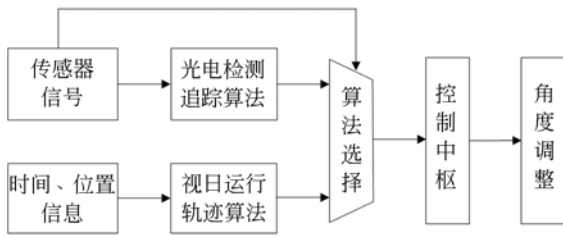


图 4 系统软件原理框图

Fig. 4 Block diagram of system software

4.1 视日运动轨迹追踪方法

视日运动轨迹追踪方法,是一种开环的软件算法,没有反馈源,不具备自纠正能力。根据系统时间与地理位置信息,计算太阳高度角与方位角^[17]。其中高度角 β 为:

$$\sin \beta = \sin \gamma \sin \delta + \cos \gamma \cos \delta \cos \omega, \quad (1)$$

式中: δ 为太阳赤纬角; γ 为装置安装地的纬度; ω 为太阳时角。

方位角 α 为:

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \beta}. \quad (2)$$

视日运动轨迹追踪法的追踪精度基于软件的计算精度及装置的安装误差。通过使用光电检测追踪法对装置的安装位置进行测定,可有效减小装置的安装误差,提高视日运动轨迹法的追踪精度。

4.2 光电检测追踪方法

光电检测追踪方法是一种基于硅光电池传感器的算法。传感器模块采集光照度信号并把数据传入控制器,控制器分析数据,计算太阳的位置偏差,最终发出控制信号进行角度调整。在粗调工作状态下,系统只进行方位角调整。由于方位误差较大,系统控制采用比例控制:

$$y = k_1 e_1, \quad (3)$$

式中: y 为输出控制量; k_1 为常数比例因子; e_1 为粗调传感器的偏差值:

$$e_1 = u_5 - u_6, \quad (4)$$

式中: u_5 、 u_6 分别为 5、6 号传感器采集的电压值。

在细调工作模式下,系统进行精确跟踪。以南北方向 2 号和 4 号传感器为例。通过分析太阳追踪运动的特点发现,当太阳在垂直方向偏差较大时,相对的两个传感器差值 e_2 较大。随着偏差减小, e_2 的数值迅速变小,这个过程是非线性的。当偏差减小到一定程度,它的变化又非常缓慢。由于太阳追踪的非线性行为,传统的比例调节会

造成系统振荡,并且追踪过程缓慢,因此采用一种变比例因子的比例控制算法。设计由多个分段函数构成的比例因子函数 $k_2 = f(e_2)$, 如图 5 所示。

跟踪过程中,当偏差 e_2 较大时, $f(e_2)$ 给出大的比例因子,加大控制力,系统快速纠正误差。当偏差 e_2 较小时, $f(e_2)$ 给出小的比例因子,减小控制力,系统平稳跟踪。当 e_2 小于设定的容限阈值时,系统默认达到跟踪精度,比例因子为零。

最终系统的输出为:

$$y = k_2 e_2. \quad (5)$$

采用此算法,不仅可实现快速准确的角度跟踪,而且降低了系统震荡,提高系统跟踪的稳定性。

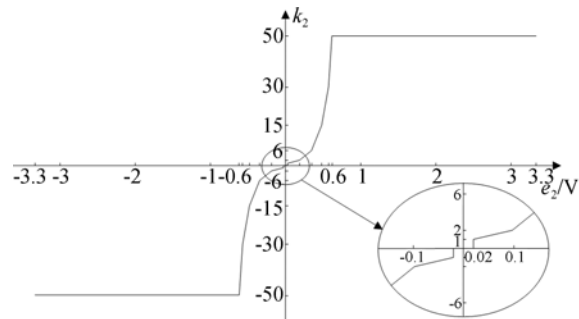


图 5 比例因子函数

Fig. 5 Function of proportionality factor

5 实验研究

为验证所设计的太阳追踪系统的稳定性及对太阳能板功率的影响,在室外进行试验研究。在 2015 年 4 月某天,天气晴朗,进行测试试验。采用两块相同型号的太阳能电池板测试,其中电池板 A 以固定角度进行辅助测试,电池板 B 安装在追踪系统上进行测试,如图 6 所示。测试从早晨 7 点开始,到下午 5 点结束。测试过程中,每 30 min 对两块电池板的参数进行测试记录。整个过程中,固定测试和跟踪测试太阳电池板的功率(短路电流 I_{sc} \times 开路电压 V_{oc})对比如图 7 所示。

从图 7 可以看出,与固定角度的太阳电池板相比,采用追踪系统的太阳能电池板功率值更高。这说明追踪系统可以使太阳能电池板获得更大的光电转换效率。这种转换效果在上午和下午时很明显,但在 11~12:30 时间段内波形有波折,这是因为在对应时间段内天空有云层出现,太阳光强受到影响,导致功率的变化。但在此时间段内,

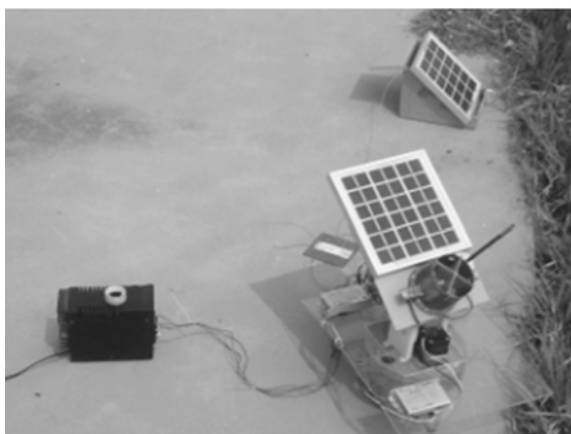


图 6 固定与跟踪系统比较实验

Fig. 6 Comparative experiment of tracking system with the fixed system

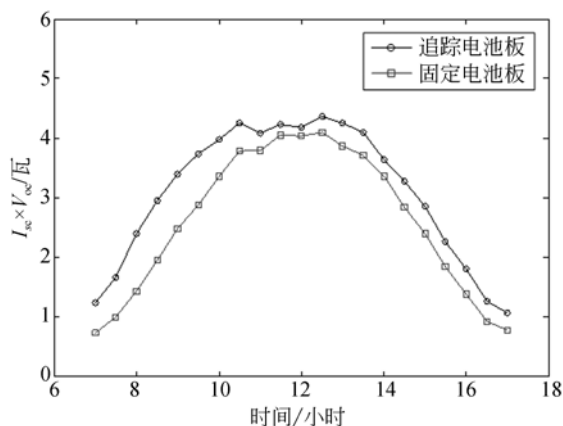


图 7 固定与跟踪太阳能电池板功率图

Fig. 7 Power value of tracking solar panels and the fixed panels

光电转换效率仍然高于固定角度的太阳能电池板。这也充分说明了跟踪算法能够对天气的细微变化响应和快速调整追踪。

为研究系统的跟踪精度,利用测量杆对系统跟踪误差进行了测试。测量杆垂直安装在感光平台上。跟踪过程中,测量标定杆的投影误差,根据

参考文献:

- [1] 杨东军,方伟,叶新,等. 星载太阳辐射监测仪的高精度太阳跟踪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2483-2490.
YANG D J, FANG W, YE X, *et al.*. High precision sun-tracking of spaceborne solar irradiance monitor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2483-

杆长计算误差角度。整个过程中的角度误差如图 8 所示。

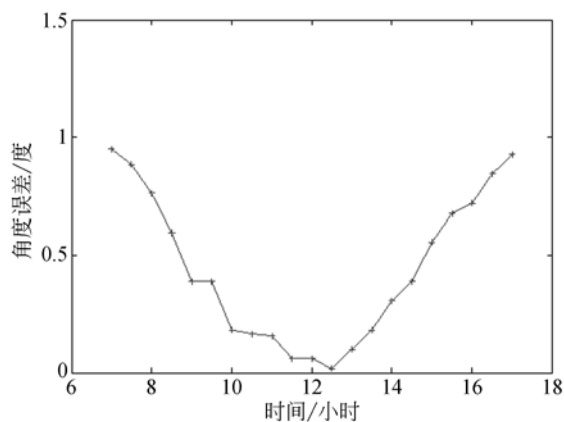


图 8 跟踪系统角度误差

Fig. 8 Angular error of tracking system

对图 8 的角度误差曲线进行分析,可见在一天过程中,从清晨起,追踪角度误差逐渐减小,至中午达到最低,然后逐渐上升,但在追踪过程中误差始终小于 1° ,在清晨和傍晚的时候光线不强,所以系统会有较大跟踪角度误差,中午时太阳光最强,跟踪角度误差几乎为零。在整个测量过程中,误差受太阳光光强影响而有不同变化,但总体误差变化在 1° 内,追踪过程稳定。

6 结 论

本文对基于 STM32 的太阳自动追踪装置进行了研究,所提出的一种六光敏区的传感器布局,用于大角度范围的太阳位置检测,检测精度高。基于粗调模式和细调模式结合的控制策略,追踪速度快。经试验测试表明,系统运行稳定,光电检测追踪角度误差小于 1° ,可工作在不同天气情况下。该追踪系统成本低,功能强,试用范围广,具有很强的应用前景。

2490. (in Chinese)

- [2] KIANOOSH A, ALI G. Design and manufacturing of a high-precision sun tracking system based on image processing[J]. *International Journal of Photoenergy*, 2013, 13(2):260-280.
[3] RUSTEMLI S, DINCER F, UNAL E, *et al.*. The analysis on sun tracking and cooling systems for photovoltaic panels[J]. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 2013, 22(8):598-603.
- [4] LAZAROIU G C, LONGO M, ROSCIA M, *et al.*. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 92: 143-148.
- [5] SEFA İ, DEMIRTAS M, ÇOLAK İ. Application of one-axis sun tracking system [J]. *Energy conversion and Management*, 2009, 50 (11): 2709-2718.
- [6] YAO Y, HU Y, GAO S, *et al.*. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies [J]. *Renewable Energy*, 2014, 72(4): 88-98.
- [7] 赵争鸣, 陈剑, 孙晓璇. 太阳能光伏发电最大功率点跟踪技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
ZHAO ZH M, CHEN J, SUN X Y. *Maximum power point tracking technology for photovoltaic power generation*[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry. 2012. (in Chinese)
- [8] 史伟会, 孟婵, 孙以泽, 等. 基于七点法太阳定位器的自动跟踪系统研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(7):142-145.
SHI W H, MENG ZH, SUN Y Z, *et al.*. Study of automatic tracking system of solar locator based on seven-point method [J]. *Water Resources and Power*, 2011, 29(7):142-145. (in Chinese)
- [9] BAZYARI S, KEYPOUR R, FAEHANGI S, *et al.*. A study on the effects of solar tracking systems on the performance of photovoltaic power plants [J]. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, 2(04): 718-728.
- [10] 王红睿, 王玉鹏, 方伟. 智能双模式太阳跟踪器[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1605-1611.
WANG H R, WANG Y P, FANG W. Intelligent solar tracker with double modes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1605-1611. (in Chinese)
- [11] 刘福才, 赵阳, 杨亦强, 等. 高空气球太阳能电池标定用太阳跟踪控制技术[J]. *航空学报*, 2014, 35(11):3137-3144.
LIU F C, ZHAO Y, YANG Y Q, *et al.*. Sun tracking technology for balloon flight solar cell calibration [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(11): 3137-3144. (in Chinese)
- [12] 吕文华, 贺晓雷, 于贺军, 等. 全自动太阳跟踪器的研制和应用[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12):2544-2550.
LU W H, HE X L, YU H J, *et al.*. Development of full-automatic solar tracker and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12):2544-2550. (in Chinese)
- [13] 刘景艳, 李玉东, 杨晓邦. 基于 ARM 的太阳自动跟踪双模糊控制系统[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(8):2139-2142.
LIU J Y, LI Y D, YANG X B. Solar automatic tracking double fuzzy control system based on ARM [J]. *Computer Measurement & Control*, 2012, 20(8):2139-2142. (in Chinese)
- [14] 卞新高, 杨缝缝, 辛秋霞. 一种大范围太阳光线自动跟踪方法[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(10):1298-1303.
BIAN X G, YANG F F, XIN Q X. An automatic sun-tracking method in large range [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2010, 31(10):1298-1303. (in Chinese)
- [15] ZHU X M, MI X L, LIN K ZH, *et al.*. Precise sun-tracking control of heliostats based on a sun's image reference system[C]. *Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese. IEEE*, 2014: 2745-2748.
- [16] 姜春霞, 王灿进, 陈娟. 双模式太阳跟踪器太阳质心提取算法[J]. *中国激光*, 2015(2):285-292.
JIANG CH X, WANG C J, CHEN J. Sun centroid extraction algorithm for solar tracker with double modes[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015(2): 285-292. (in Chinese)
- [17] RIZAL Y, WIBOWO S H. Application of solar position algorithm for sun-tracking system[J]. *Energy Procedia*, 2013, 32: 160-165.

作者简介:



张玉燕(1976—),女,天津人,博士,教授,硕士生导师,2001年于燕山大学获得硕士学位,2008年于燕山大学获得博士学位,主要从事光电检测和自混合干涉测量方面的研究。E-mail: yyzhang@ysu.edu.cn



刘勇(1992—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事光电检测和太阳能电池标定方面的研究。E-mail: ly5119@sina.com