

# 一种大范围光电跟踪传感器的实验研究

宁宇\*, 彭佑多\*\*, 颜健

湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201

**摘要** 提出了一种大范围光电跟踪传感器并介绍了其工作原理,搭建了实验平台并开展了传感器高度角和方位角的视场范围及其跟踪精度的实验研究。结果表明,传感器在方位角的视场范围为 $-180^{\circ}\sim+180^{\circ}$ ,高度角的视场范围为 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ ,满足了传感器响应范围广泛的要求;精跟踪精度较高且误差为 $\pm 1.5^{\circ}$ ,能满足太阳能光伏发电对跟踪精度的要求。该研究为太阳跟踪光电传感器的开发和使用提供了依据。

**关键词** 传感器; 太阳能; 光电跟踪; 聚光器; 双轴跟踪

中图分类号 TP272

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.012801

## Experimental Study of Wide Range Photoelectric Tracking Sensors

Ning Yu\*, Peng Youduo\*\*, Yan Jian

Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

**Abstract** A wide range photoelectric tracking sensor is proposed and its working principle is introduced. A test platform is set up and the fields of view of altitude and azimuthal angle as well as its tracking accuracy are experimentally studied. The results show that as for this sensor, its field of view of azimuthal angle is  $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$  and that of altitude is  $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ . Thus the requirement of wide response range for sensors is satisfied. In addition, the accurate tracking accuracy is high and the error is  $\pm 1.5^{\circ}$ , therefore the requirement of tracking accuracy for the solar photovoltaic power generation is also satisfied. This research provides a basis for the development and use of solar tracking photoelectric sensors.

**Key words** sensors; solar energy; photoelectric tracing; solar concentrator; double-axis tracking

**OCIS codes** 280.4788; 040.5160; 350.6050

## 1 引言

随着经济的高速发展,不可再生能源的消耗越来越快,同时大量化石能源的使用导致自然环境污染严重,包括酸雨、温室效应、热污染等<sup>[1]</sup>。面对自然环境的恶化,世界各国投入了大量的人力、物力开发新能源。太阳能作为一种典型的新能源,具有取之不尽、用之不竭且清洁无污染等特点,发展前景非常广阔,对其开发利用将成为解决能源短缺、环境污染等问题的重要途径<sup>[2-3]</sup>。随着太阳能各方面的技术越来越成熟,太阳能的使用成本也逐渐降低,因此人们更多地关注太阳能的利用率问题。在传统的太

阳能接收装置中加入太阳跟踪技术能够提高太阳能的利用率。太阳跟踪技术主要有视日轨迹跟踪、光电跟踪及混合跟踪等模式<sup>[4]</sup>。其中,光电跟踪是一种闭环控制系统,具有较高的灵敏度和跟踪精度,能够对太阳位置进行及时反馈且能够实现自适应调节。因此,研究光电跟踪具有重要的意义。

光电跟踪主要由光电传感器构成。近年来,许多学者对光电传感器研究投入了大量的精力,且在理论和实验研究方面均做出了重要的贡献。本课题组前期也做过较多研究,胡亮等<sup>[5]</sup>研究的“程控+光控”跟踪误差校正分析表明,跟踪系统通过光电探测器的误差校正能够有效地提高跟踪精度;彭长清

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-06-11; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(51641504)、湖南省自然科学基金(2016JJ2052)、湖南省研究生科研创新项目(CX2016B549)

\* E-mail: 15697321287@163.com; \*\* E-mail: ydpeng1964@163.com

等<sup>[6]</sup>研究的自适应模糊 PID 控制下的聚光器跟踪控制系统具有较高的跟踪精度,也具有较强的抗干扰能力和较好的稳定性。此外,唐自豪等<sup>[7]</sup>提出的两级式太阳跟踪数字光电跟踪传感器,其偏差检测精度可达到  $0.1^\circ$ ,具有较高的跟踪精度,但追踪视场范围偏小,容易丢失跟踪目标,导致系统不稳定。夏小燕<sup>[8]</sup>提出的大范围太阳光线跟踪传感器,其精度可达到  $22''$ ,高度角和方位角跟踪范围达到  $180^\circ$ ,且在各种工况下都能稳定工作,具有极大的利用价值。Hoffmann 等<sup>[9]</sup>提出 LDR 式的传感器跟踪太阳,具有结构简单、控制简单和跟踪范围较广等优点,但其跟踪精度不高且对光电元器件的材料性能要求较高。Arbab 等<sup>[10]</sup>研究的基于机器视觉的传感器,具有全方位的跟踪太阳的功能,但其程序算法较复杂,无法普及应用。

在结构上从不同的角度研究了传感器,本文提出了一种大范围光电跟踪传感器,能够有效地解决目前光电传感器跟踪视场范围小、跟踪精度偏低及

价格昂贵等问题。针对该传感器进行了视场范围测试实验和跟踪精度检测实验,为光电传感器的开发利用和研制提供重要参考依据。

## 2 大范围光电跟踪传感器原理及设计

### 2.1 大范围光电跟踪传感器系统组成

大范围光电跟踪传感器系统原理如图 1 所示。该系统包括粗跟踪模块、精跟踪模块及控制模块。粗跟踪模块进行大范围搜索光源,确定光源的大致位置,实现传感器视场范围广的功能。粗跟踪模块完成后,精跟踪模块对传感器进行微调,使得传感器的主光轴线对准光源。控制模块对粗、精跟踪模块进行调控,系统上电启动后先进入粗跟踪模块,再进入精跟踪模块,同时驱动执行机构调节双轴跟踪装置在高度角和方位角方向转动。在跟踪的过程中,粗、精跟踪模块先对采集的光信号经模数转换成电信号,再通过 USB 接口传输至个人计算机(PC)收集处理。

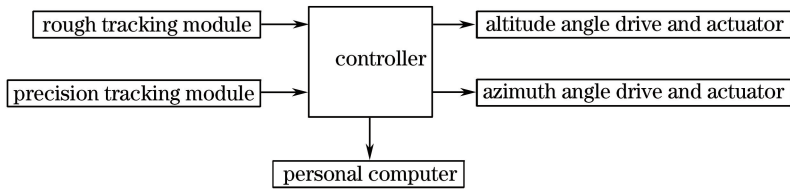


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic of system

### 2.2 粗跟踪模块原理

粗跟踪模块包括三棱台安装座和 3 个光敏元器件,其中三棱台安装座的斜面分别设有一个光电转换元件,系统将 3 个光电转换元件所接收的光信号通过模数转换器(ADC)将电路转换成数字信号送入单片机进行处理。系统上电后,首先判断太阳光照强度是否达到光电跟踪要求,此处的阈值由可调电阻进行调节。当输入的偏差信号小于单片机程序设定的阈值时,完成粗跟踪模块。受环境光的影响,3 个光敏元器件所接收的光信号不能绝对相等,因此其输入的偏差信号在完成粗、精跟踪时都将限定在一个很小的阈值范围内,实验的阈值  $\delta_1$  设定为  $0.05\text{ V}$ ,阈值  $\delta_2$  设定为  $0.02\text{ V}$ 。光照强度不同导致光敏元器件电阻值发生变化,进而产生不同的电信号,微处理器对 3 个电信号进行实时数据处理,进而控制高度角驱动及执行机构和方位角驱动及执行机构进行相应的动作,粗跟踪能够全方位地感应太阳光,提升了传感器跟踪视场范围,其结构如图 2 所示。

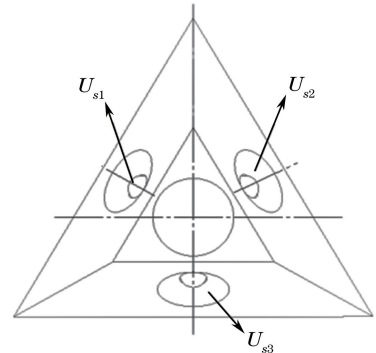


图 2 粗跟踪模块原理图

Fig. 2 Schematic of rough tracking module

由上述可知,3 个光电转换元件接收到不同的光照强度,将产生不同偏差信号,设光电转换元件输出信号所对应的采集信号电压值为  $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$ 、 $U_{s3}$ ,根据粗跟踪模式的原理,可以得到粗跟踪的方位角偏差信号  $\Delta U_x$  和高度角偏差信号  $\Delta U_y$ :

$$\Delta U_x = \frac{U_{s1} - U_{s2}}{U_{s1} + U_{s2} + U_{s3}}, \quad (1)$$

$$\Delta U_y = \frac{U_{s1} - U_{s3}}{U_{s1} + U_{s2} + U_{s3}} \quad (2)$$

系统可以控制相应电机正转或反转,实现对双轴跟踪装置的方位角和高度角的调整,使传感器的主光轴线朝向太阳光照强度最大的方向。

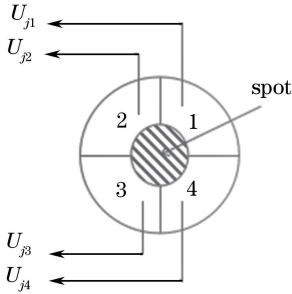


图3 精跟踪模块原理图

Fig. 3 Schematic of precision tracking module

### 2.3 精跟踪模块原理

粗跟踪完成后,传感器大致对准太阳,此时启动精跟踪模式。其由平凸透镜、圆柱筒和4个光敏元器件组成,其原理如图3所示。当光照射时,光敏电阻价带中的电子吸收光子能量后跃迁到导带,成为自由电子,同时产生空穴,电子-空穴对的出现使得电阻率变小。光照越强,产生的电子-空穴对就越多,其阻值就越低;光强减弱时,电子-空穴对对逐渐复合,其阻值将逐渐增加<sup>[11]</sup>。系统根据4个光敏元器件阻值的变化,产生不同的电信号,微处理器对这4路电信号进行实时数据处理,进而控制高度角驱动机构和方位角驱动机构进行相应的动作,实现精跟踪。

由上述可知,相对布置的4个光敏元器件接收到不同的光照强度,将产生不同偏差信号,设光敏元器件输出信号所对应的采集信号电压值分别为  $U_{j1}$ 、 $U_{j2}$ 、 $U_{j3}$  和  $U_{j4}$ ,光斑在每个象限上的光面积分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  和  $A_4$ ,光斑的中心坐标为  $(x_0, y_0)$ ,  $D_x$  和  $D_y$  分别为光斑在  $x$  和  $y$  轴上的偏差值。根据上述原理,可以得到精跟踪的方位角偏差信号  $\Delta U_x$  和高度角偏差信号  $\Delta U_y$  为

$$\Delta U_x = \frac{U_{j1} + U_{j4} - U_{j2} - U_{j3}}{U_{j1} + U_{j2} + U_{j3} + U_{j4}} \quad (3)$$

$$\Delta U_y = \frac{U_{j1} + U_{j2} - U_{j3} - U_{j4}}{U_{j1} + U_{j2} + U_{j3} + U_{j4}} \quad (4)$$

如果不考虑大气影响,太阳光经过平凸透镜在精跟踪探测盘上光斑能量分布为高斯分布,若采用积分的方法计算每个象限的光能量,则很难在实际

工作中实现。如果通过均匀化处理,可近似的把探测盘上的光斑看作是均匀分布的,则每个象限的光能量和电压值与光斑面积成正比<sup>[12]</sup>,即:

$$D_x = \frac{A_1 + A_4 - A_2 - A_3}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \quad (5)$$

$$D_y = \frac{A_1 + A_2 - A_3 - A_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} \quad (6)$$

由图3可以得到  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ ,将求得的4个面积代入到(5)、(6)式中,得:<sup>[13]</sup>

$$D_x = \frac{1}{\pi r^2} \left( 2r^2 \frac{x_0}{r} + 2rx_0 \right) \approx \frac{2x_0}{\pi r} \quad (7)$$

$$D_y = \frac{1}{\pi r^2} \left( 2r^2 \frac{y_0}{r} + 2ry_0 \right) \approx \frac{2y_0}{\pi r} \quad (8)$$

根据(7)、(8)式得到方位角偏差值  $D_x$  和高度角偏差值  $D_y$ ,系统可以根据得到的偏差值对双轴跟踪装置的高度角和方位角调整,实现传感器的精跟踪。

### 2.4 传感器设计

在大范围光电跟踪传感器中,粗跟踪模块包括三棱台安装座和3个光敏电阻,三棱台安装座的顶面设有安装定位孔,精跟踪模块内嵌入三棱台安装座的安装定位孔。采用硫化镉(CdS)光敏电阻作为传感器的光敏元器件,直径为5 mm,工作的环境温度为一30℃~70℃,能够满足实验要求。粗跟踪模块中3个光敏电阻分别安装在三棱台外表面的中心位置,其三棱台斜面与底面的夹角  $\beta = 75^\circ$ ,三棱台底边长度  $a_1 = 130$  mm、高度  $a_2 = 90$  mm;精跟踪模块中4个光敏电阻分别对称安装在圆柱筒底面的上下左右4个象限,圆柱筒的直径  $d = 25$  mm、高度  $a_3 = 50$  mm。传感器内部结构及安装位置关系如图4所示。

控制模块包括单片机、高度角驱动机构、方位角驱动机构、PC机,其中采用STC15F系列的单片机作为控制器。系统首先上电初始化,判断太阳光强是否达到光电跟踪要求,ADC对粗跟踪模块进行数据采集,得到偏差信号  $\Delta U_x$ 、 $\Delta U_y$ ,若偏差信号大于阈值  $\delta_1$ ,则系统将控制相应电机正/反转,直到偏差信号在阈值  $\delta_1$  范围内,完成粗跟踪;ADC对精跟踪模块进行数据采集,且系统控制相应电机正/反转使得偏差信号在阈值  $\delta_2$  范围内,完成精跟踪。得到的数据将通过串口传到PC机。其粗、精跟踪模块采集电路如图5所示,软件流程如图6所示。

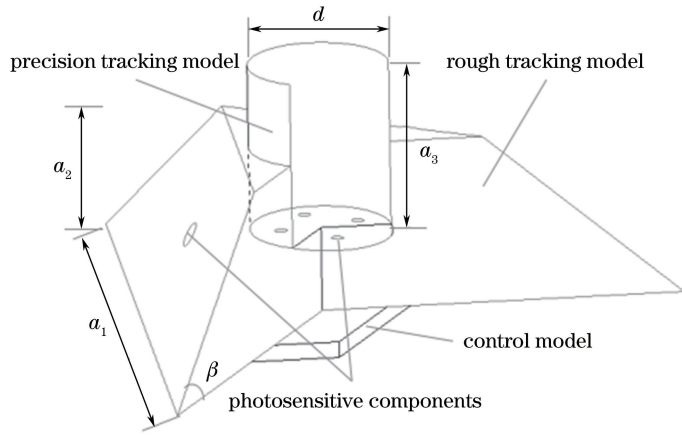


图 4 传感器内部结构及安装位置关系

Fig. 4 Internal structure of sensor and installation positions

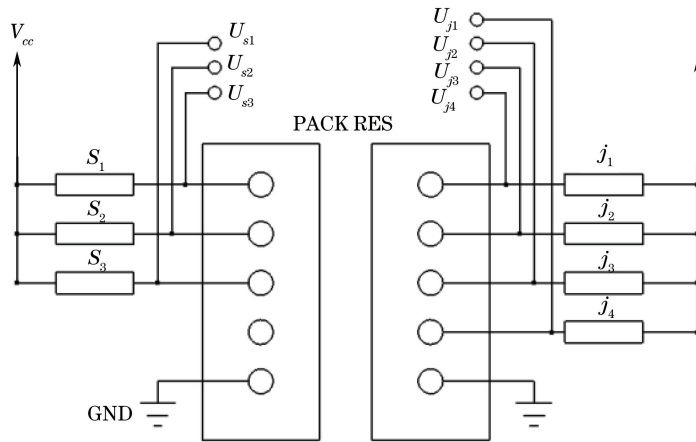


图 5 传感器采样电路

Fig. 5 Sampling circuit in sensor

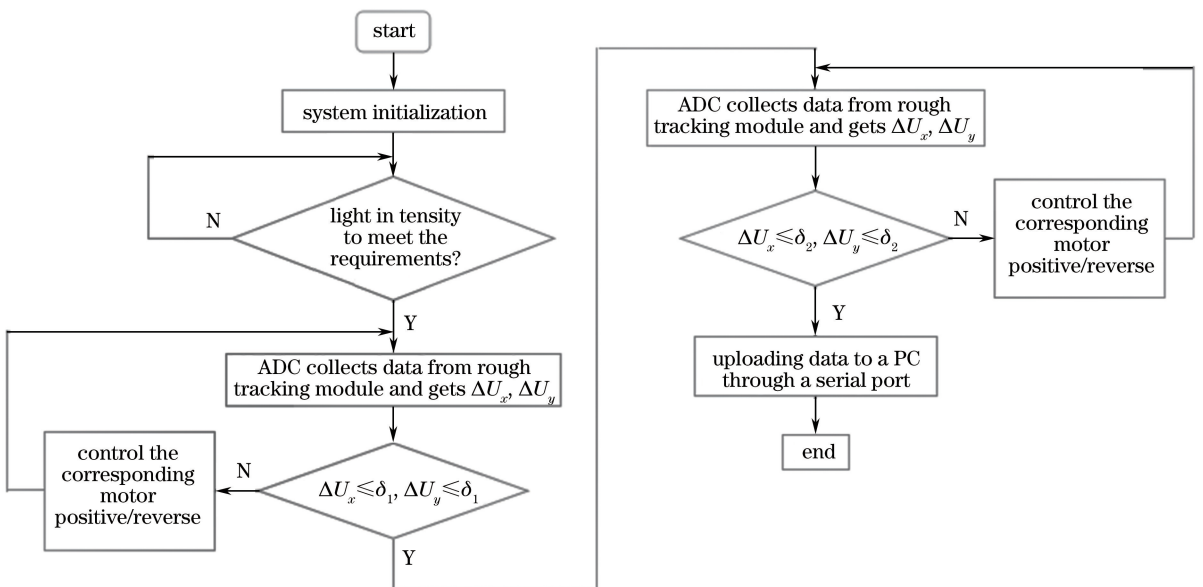


图 6 软件流程图

Fig. 6 Flow chart of software

### 3 实验研究

#### 3.1 实验平台搭建

为了测得大范围光电跟踪传感器视场跟踪范围及跟踪精度,搭建了如图 7 所示的系统实验装置平台,平台包括大范围光电跟踪传感器、测试装置、双轴跟踪装置、高度角直流电机、方位角直流电机、PC 机等,其中大范围光电跟踪传感器如图 8 所示。

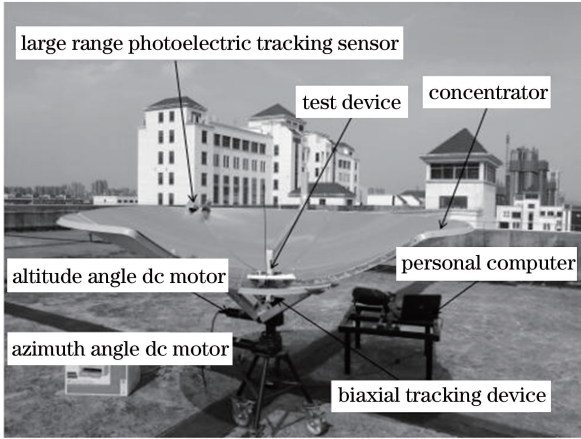


图 7 系统实验装置图

Fig. 7 Schematic of experimental device

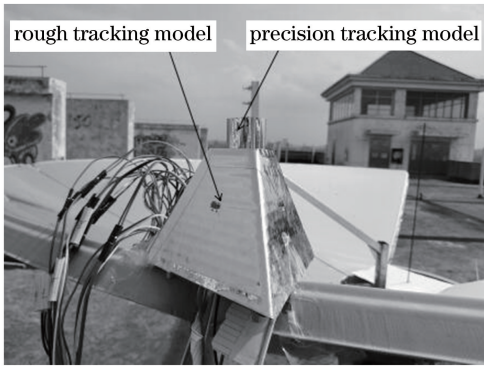


图 8 大范围光电跟踪传感器实物图

Fig. 8 Physical picture of wide range photoelectric tracking sensor

实验安装过程中须保证传感器的主光轴线与聚光器的中心轴线及测试装置的直杆平行。为提高驱动转矩,采用两个 24 V 的直流电机作为高度角和方位角的驱动电机。双轴跟踪装置由水平和竖直两个蜗轮蜗杆减速器组成,其中高度角直流电机固定安装在竖直蜗轮蜗杆减速器上,竖直蜗轮蜗杆减速器固定安装在与水平蜗轮蜗杆减速器相连的联轴器上,用来调整聚光器或太阳能光伏板在经度方向的跟踪;方位角直流电机固定安装在水平蜗轮蜗杆减速器上,其蜗轮通过轴与支架连接,用来调整聚光器

或太阳能光伏板在纬度方向的跟踪,结构示意图如图 9 所示。测试装置由直杆和白板组成,直杆垂直白板,白板安装在太阳能光伏板上且与光伏板平行,测试装置通过测量直杆在白板上的投影来检测太阳光线的实时跟踪精度。系统将采集到的数据通过 USB 接口连接到 PC 机上显示。

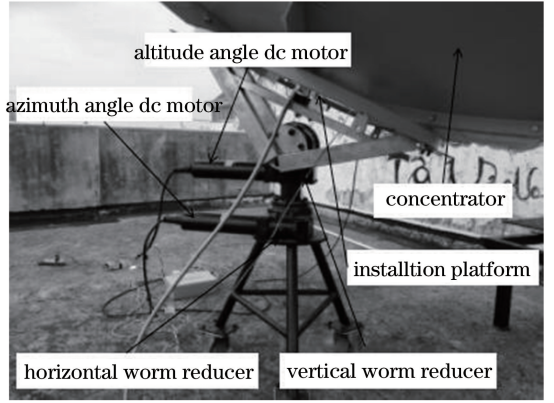


图 9 双轴跟踪装置结构图

Fig. 9 Structural diagram of double-axis tracking device

#### 3.2 传感器跟踪视场范围实验

为更方便准确测量传感器的追踪视场范围,采用光源进行实验,避免了在太阳光下进行实验时,需在光敏电阻外表面贴一层滤光膜,提升对杂散光、反照光的抑制能力。传感器方位角和高度角的跟踪视场范围是由光源放置在相对于传感器的各个方位进行确定,其在高度角和方位角方向的光源安装位置如图 10 所示。测试传感器在高度角方向的跟踪视场范围,先将聚光器和光源置于同一个竖直平面,光源在下方且照射方向与传感器的主光轴线垂直。每隔 1 s 对粗跟踪的 3 个光敏元器件所接收到的光信号进行一次数据采集,并进行模数转换,得到数字信号,以串口通信的方式将数字信号传输到 PC 机。对其进行数值分析处理,可以得到传感器在高度角方向的跟踪视场范围,如图 11(a)所示。同样,测试传感器在方位角方向的跟踪视场范围,先将聚光器

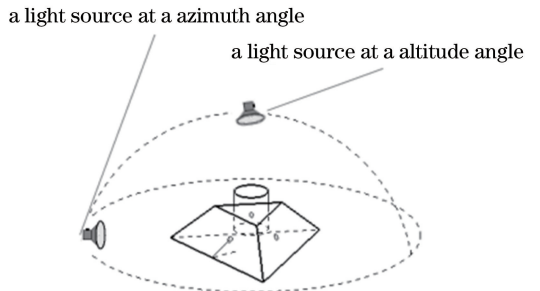


图 10 光源安装位置示意图

Fig. 10 Schematic of installation position of light source

和光源置于同一水平面,光源在传感器的一侧且照射方向与传感器的主光轴线垂直。每隔 1 s 对 3 个光敏元器件所接收的光信号进行一次数据采集,再

进行模数转换,并对转换后的数字信号进行数值分析处理,可以得到传感器在方位角方向跟踪视场范围,如图 11(b)所示。

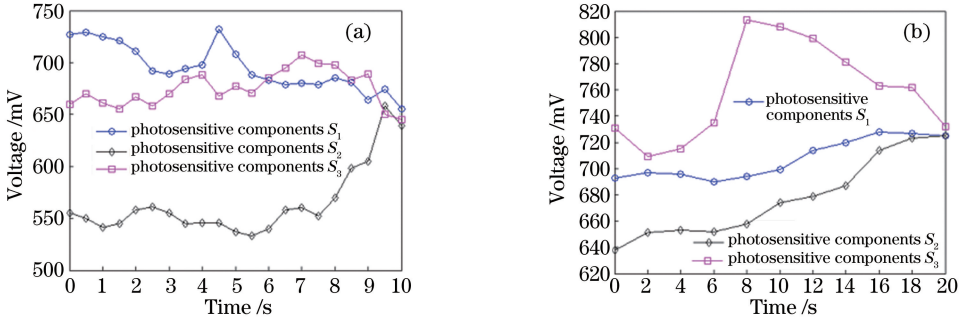


图 11 光敏电阻电压随高度角和方位角跟踪时间变化曲线。(a)高度角;(b)方位角

Fig. 11 Photosensitive resistance voltage versus altitude and azimuthal angle. (a) Altitude angle; (b) azimuthal angle

如图 11 所示,当 3 个光敏电阻输入的电电压值趋于相等时,则说明高度角、方位角跟踪过程结束,达到了视场范围角要求。图 11(a)为高度角跟踪,当  $t=0$  时,3 个光敏元器件所接收的光信号都不相同,因此光源在偏离传感器主光轴线比较远的位置。随着时间的推移, $S_1$  变化比较缓慢,接收到的光信号比较均匀; $S_2$  缓慢增加,接收到的光信号也是逐渐增加; $S_3$  先逐渐增加后逐渐下降,接收到的光信号也是先增多后减少,当  $t=4$  s 时,因为受环境光的影响,导致  $S_3$  所接收到的光信号突然变高;当  $t=10$  s 时,3 个光敏元器件接收到的光信号都在程序设定的阈值范围内,完成了粗跟踪高度角方向的跟踪,因此,传感器在高度角方向的视场跟踪范围在  $-90^\circ \sim +90^\circ$  之间。图 11(b)为方位角跟踪,当  $t=0$  时,3 个光敏元器件所接收到的光信号差别较大,因此传感器的主光轴线无法对准光源照射方向。随着时间的推移, $S_1$  缓慢降低,所接收到的光信号逐渐减少; $S_2$  变化平缓然后逐渐增加,接收到的光信号也是先均匀变化后逐渐增加; $S_3$  变化比较平缓,所接收到的光信号变化比较均匀;其中微小的锯齿波是单片机本身的模数转换精度和外部环境干扰导致的。当  $t=20$  s 时,3 个光敏元器件电信号的偏差值在程序设定的阈值  $\delta_1$  范围内,则传感器主光轴线基本对准光源的照射方向,完成了粗跟踪方位角方向的跟踪,因此,传感器在方位角方向的视场跟踪范围为  $-180^\circ \sim +180^\circ$ ,相比四象限探测器及两级式太阳跟踪数字光电传感器,该传感器具有较大的跟踪视场范围。

### 3.3 传感器跟踪精度实验

为测量传感器的跟踪精度,安装一根与聚光器

的中心轴线平行的直杆,通过测量直杆在白板上的投影实时检测传感器的跟踪精度,其测量原理如图 12 所示,测量装置由白板和直杆组成,直杆垂直安装在白板上且长度为  $H$  (实际长度取 600 mm),原理图中测量装置的实际位置采用实线表示,理想位置用虚线表示,若实际位置与理想位置重合,则表示传感器主光轴线与太阳直射方向平行且直杆在白板上投影为一个圆点。若存在误差,则实际位置和理想位置之间会有夹角,设夹角为  $\theta$ ,直杆在白板上投影为图中投影长度  $l$ 。由原理图得到几何关系:

$$l = \tan \theta \cdot H, \quad (9)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{l}{H}\right), \quad (10)$$

式中  $l$  可以通过现场实时检测投影长度得到,并用  $\theta$  分析精跟踪模式的跟踪精度。

实验时间为 2018 年 4 月 18 日~25 日,每天数

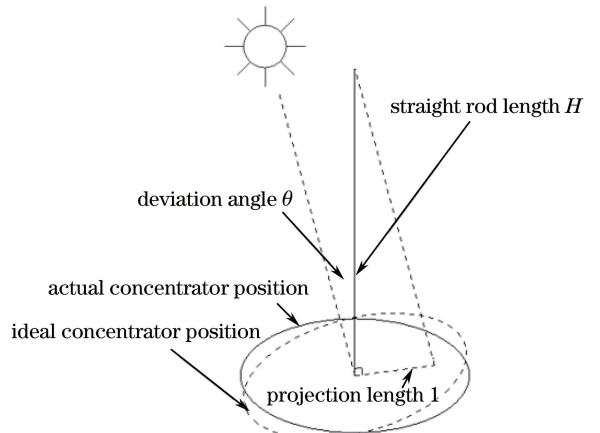


图 12 精跟踪测量原理图

Fig. 12 Schematic of precision tracking and measurement

据测量时间均为 9:00~17:30,每隔 0.5 h 检测一次投影长度  $l$  并取平均值。按照(10)式可得到偏差角  $\theta$ ,最终得到的部分实验测试数据如表 1 所示。

表 1 实验测试数据

Table 1 Data from experimental test

Experimental time	$l$ /mm	$\theta$ /( $^{\circ}$ )
9:00	11	1.03
9:30	10	0.97
10:00	9	0.86
10:30	8	0.74
11:00	10	0.97
11:30	12	1.15
12:00	6	0.57
12:30	8	0.74
13:00	9	0.86
13:30	11	1.03
14:00	10	0.97
14:30	9	0.86
15:00	10	0.97
15:30	12	1.15
16:00	9	0.86
16:30	11	1.03
17:00	13	1.26
17:30	15	1.43

由上述实验数据可知,直杆长度  $H=600$  mm,检测得到的投影长度  $l$  最大值为 15 mm,最大偏差角为  $1.43^{\circ}$ ,由此得出传感器精跟踪误差  $<1.5^{\circ}$ 。由于整个实验平台存在安装误差和人为的测量误差,因此,实验结果在合理的误差范围内,若精跟踪采用标准的 PSD 位置探测器或四象限探测器,则精度会更高。

## 4 结 论

提出基于粗-精跟踪模式的大范围光电跟踪传感器,其粗跟踪模式实现了传感器的大范围追踪,能有效避免跟踪目标丢失且能实时检测数据;精跟踪模式能使传感器快速地响应太阳光,且只需在小范围内调整就能使传感器精准跟踪太阳,大大提高了传感器的跟踪效率和跟踪精度。

搭建了由大范围光电跟踪传感器、测试装置、双轴跟踪装置、高度角直流电机、方位角直流电机、PC 机等构成的系统实验装置,完成了传感器跟踪视场范围及跟踪误差实验。所设计的实验装置有助于相关学者更深入的研究。

传感器跟踪视场范围实验数据表明,传感器在高度角方向跟踪视场范围为  $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ ,在方位

角方向跟踪视场范围为  $-180^{\circ}\sim+180^{\circ}$ ,能够实现全方位跟踪太阳。

在精跟踪模式下,传感器的跟踪误差为  $\pm 1.5^{\circ}$ ,能够满足太阳能光伏发电对跟踪精度的要求,且该传感器可采用价格便宜、制造安装简便的光敏电阻或光电电池作为光敏元器件。

## 参 考 文 献

- [1] Yan J, Peng Y D, Yu J H, *et al.* Research on thermal-structural-optical multi-field coupling modeling and concentrating performance predication of solar dish system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(14): 138-151.  
颜健,彭佑多,余佳焕,等.碟式太阳能光热系统光-机-热多场耦合建模及其聚光性能预测应用[J].机械工程学报, 2015, 51(14): 138-151.
- [2] Xiao X, Xie S W, Zhang Z Y, *et al.* Confinement and trapping of light in organic solar cells[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050006.  
肖啸,谢世伟,张志友,等.光在有机太阳能电池中的约束与捕获[J].激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050006.
- [3] Zhou T, Lu X D, Zhang M, *et al.* Crystalline silicon solar-cell development status and trends[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030002.  
周涛,陆晓东,张明,等.晶硅太阳能电池发展状况及趋势[J].激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030002.
- [4] Yan J, Peng Y D, Cheng Z R, *et al.* Solar concentrator mirror unit supporting-adjusting structure and posture alignment [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0522001.  
颜健,彭佑多,程自然,等.太阳能聚光器镜面单元的支撑-调节结构和位姿校准[J].光学学报, 2017, 37(5): 0522001.
- [5] Hu L, Peng Y D, Tan X H, *et al.* Solar "programmed+light control" tracking control system in photo-electric detector error correction analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(10): 257-260.  
胡亮,彭佑多,谭新华,等.太阳能“程控+光控”跟踪误差校正分析[J].计算机工程与应用, 2015, 51(10): 257-260.
- [6] Peng C Q, Peng Y D, Hu Y P, *et al.* Research and implementation of tracking control system for a high-power single-disc solar concentrator [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural

- Science Edition), 2012, 27(3): 28-34.
- 彭长清, 彭佑多, 胡燕平, 等. 大功率单碟式太阳能聚光器跟踪控制系统研究及实现[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(3): 28-34.
- [7] Tang Z H, Li P, Qian Y, *et al.* Design of two-stage digital photoelectric sensor for sun tracker [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(10): 1-6.  
唐自豪, 李鹏, 钱耀, 等. 两级式太阳跟踪数字光电传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(10): 1-6.
- [8] Xia X Y. The research of large range sun ray tracing sensors and tracing measures [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.  
夏小燕. 大范围太阳光线跟踪传感器及跟踪方法的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [9] Hoffmann F M, Molz R F, Kothe J V, *et al.* Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels [J]. Renewable Energy, 2018, 115: 750-759.
- [10] Arbab H, Jazi B, Rezagholizadeh M. A computer tracking system of solar dish with two-axis degree freedoms based on picture processing of bar shadow [J]. Renewable Energy, 2009, 34(4): 1114-1118.
- [11] Ye Y C, sun J C. Cadmium sulfide photosensitive resistor[J]. Optical Technique, 1981(5): 18-19 + 16.  
叶永昌, 孔君成. 硫化镉光敏电阻器[J]. 光学技术, 1981(5): 18-19+16.
- [12] Zhang L, Zhang G Y, Liu Y Q. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(6): 0605007.  
张雷, 张国玉, 刘云清. 影响四象限探测器探测精度的因素[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605007.
- [13] Han C, Bai B X, Yang H M, *et al.* Study four-quadrant detector in the free space laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 2030-2034.  
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 2030-2034.