

太阳能自动跟踪器的设计

卢 强,史颖刚,刘 利

(西北农林科技大学 机械与电子工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:为了充分利用太阳能,设计了太阳能自动跟踪器的机械执行部分和控制部分。详细介绍了其结构、工作原理、性能特点以及太阳位置探测单元、信号处理及控制单元、动力单元,并给出了机械执行结构图和控制电路图。光信号采集模块将光照强度反馈给控制模块,根据光照强度信号控制模块、继电器的通断和步进电机的转动实现太阳能自动跟踪器的水平、俯仰控制,使得太阳能接收器始终保持正面朝向太阳光,提高太阳能热量吸收的效果。

关键词:太阳能;自动跟踪;光敏电阻;双轴跟踪

中图分类号:S24;TP29 **文献标识码:**B **文章编号:**1002-2767(2017)08-0107-05 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2017.08.0107

作为一种洁净的能源,太阳能广泛应用于土地墒情监测^[1]、农田灌溉、供水、滴灌、喷灌^[2-3]、冬季沼气池环境改善^[4]、作物生长参数检测^[5]、田间图像采集^[6]、农产品养殖^[7]、害虫诱捕^[8]等农业作业方面。由于太阳辐射的能流密度很低、照度间断,人类想要稳定利用太阳能就需要时刻跟踪太阳的装置^[9],使太阳光聚焦从而获得高温集热、传热、蓄热或能量转换装置^[10]。理论分析表明,太阳光线运动的跟踪,能使太阳能设备能量的接收率提高 37.7%,利用率大大提高^[11]。

1 系统整体设计

系统整体机构如图 1 所示,包括太阳位置探测单元、信号处理与控制单元、驱动器、动力单元及机械执行机构。

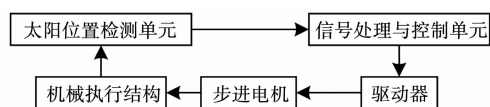


图 1 太阳能自动跟踪器系统

Fig.1 Systematic diagram of solar automatic tracker system

日光下,太阳位置探测单元,自动搜索太阳位置,将太阳方位与太阳能空气集热器所正对着的方位进行比较。当两者不一致时,检测单元发出信号,经处理后送入步进电机驱动器,驱动步进电机工作调整太阳能接收器,使其跟随太阳方位。粗跟踪找到太阳的大致方位后,精跟踪自动对太阳进行精确定位。

2 机械系统设计

太阳能自动跟踪器的机械部件设计,应该满足:能进行大范围跟踪,并避免极限位置锁死;合理选择结构,工作能耗不能超过给定值;简化结构和加工工艺,提高经济性。

2.1 跟踪器结构及工作原理

本文设计的立柱转动式跟踪器的机械结构,如图 2 所示,适用于固定地点安装,可在水平方向 360°旋转,垂直方向 0~90°旋转,能实现对太阳大范围双向自动跟踪^[12]。跟踪器主要由支架焊合、升降步进电动机、丝杠螺母传动副、蜗轮蜗杆传动副、立轴及立轴套筒焊合、转向步进电动机、底座焊合构成。

太阳位置检测单元平行安装在太阳能接收器上。太阳能接收器安装在支架上,升降步进电机以转动副的形式和支架连接;丝杠螺母机构的螺母以转动副的形式与焊接的立轴套筒上的外伸杆连接;升降步进电机通过联轴器与丝杠连接。上述机械机构可以调整太阳能接收器的竖直方向转动。

立轴套筒与立轴以边界摩擦的形式接触,套筒下端选用推力球轴承支撑;立轴与底座螺纹连接,蜗轮安装在立轴套筒上;转向步进电动机用螺钉连接在焊合底座上,蜗杆与转向步进电动机用联轴器连接,另外蜗杆用两支座支撑。上述机械机构,可以调整太阳能接收器的水平方向转动。

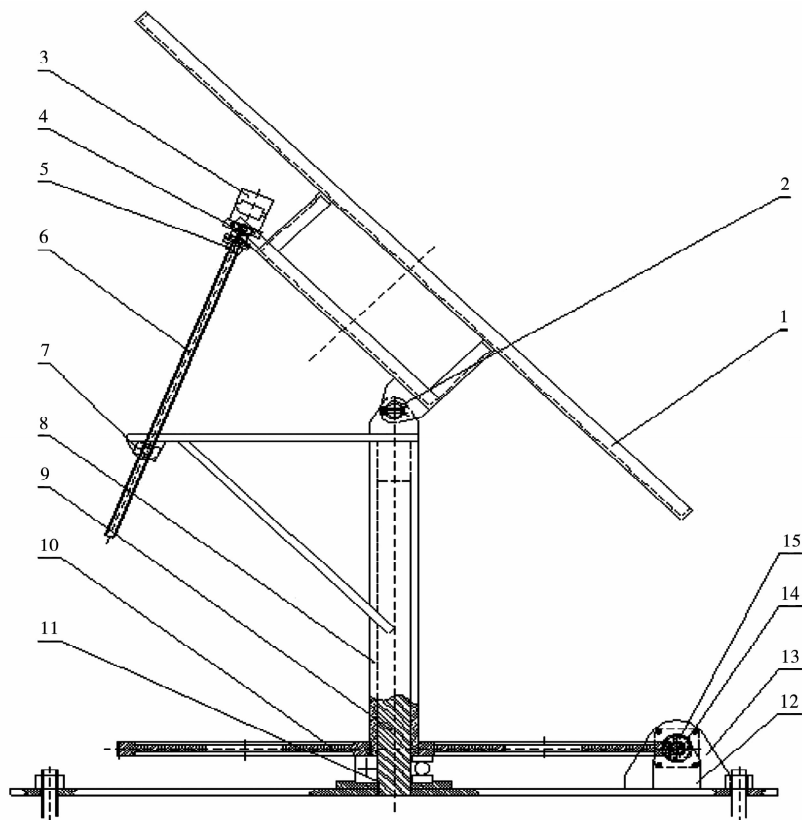
跟踪器工作时,随着光线方向的细微改变,传感器失衡,系统输出的信号产生偏差。当这一输出信号达到一定幅度时,电路控制步进电动机开始工作,驱动蜗轮蜗杆传动机构和丝杠螺母机构转动进行跟踪器调整,使传感器再次达到平衡。

收稿日期:2017-06-20

基金项目:2017 年西北农林科技大学教育教学改革研究资助项目(JY1702022)

第一作者简介:卢强(1995-),男,河南省息县人,在读学士,从事机械电子工程研究。E-mail:1003871699@qq.com。

如此不断调整,构成一个闭环负反馈系统,实现自动跟踪。



1.太阳能接收器安装支架;2.销轴;3.升降步进电机;4.升降步进电机支座;5.升降步进电机联轴器;6.螺杆;7.螺母;8.立轴套筒;9.立轴;10.蜗轮;11.推力球轴承;12.蜗杆支座;13.转向步进电机支座;14蜗杆;15转向步进电机联轴器

1.Mounting bracket of solar receiver; 2.Hingepin; 3.Stepping motor for lifting; 4.Bearing of stepping motor for lifting;5.Coupling of stepping motor for lifting;6.Screw; 7.Nut; 8.Vertical shaft sleeve; 9.Vertical shaft; 10.Worm gear; 11.Thrust ball bearing;12.Worm bearing;13.Bearing of stepping motor for steering;14.Worm; 15.Coupling of stepping motor for steering

图 2 跟踪器机械结构

Fig. 2 The mechanical structure of the tracker

2.2 步进电动机选择

太阳能自动跟踪器的垂直转动方向未用减速装置。水平转动方向采用了减速比为 720:1 的减速装置。电动机带载运行所需要的转矩为 $T = \text{负载转矩 } T_1 + \text{惯性体的加速转矩 } T_a$ 。 J 为驱动物体的惯量, θ 为步距角, f 为电动机希望的脉冲频率, t 为加速时间, 则惯性体的加速转矩 $T_a^{[13]}$ 为:

$$T_a = \frac{J}{980.7} \times \frac{3.14 \times \theta}{18} \times \frac{f}{t} \quad (1)$$

考虑到装置的摩擦很小,太阳能接收器的质量相对转动支架很小,且在计算转动架的惯量时已有很大的冗余,因此设定 $T_1=0$,太阳能接收器的惯量为 0。控制系统对步进电机的转速要求不高,因此设定输入电机的脉冲频率为 100 Hz,加速时间为 0.02 s。本设计选用细分后步距角为 0.045° 系列步进电机。根据步距角可计算出

每转需要脉冲 8 000 个,步进电动机的转速为 $0.75 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

转动支架主要由热轧等边角钢焊合而成,安装后重心和回转轴不在一条直线上。其转动惯量用计算圆柱体的转动惯量公式近似计算^[13],得其转动惯量 $J \approx 171\ 694\ \text{kg} \cdot \text{cm}^2$,再折算到转向步进电动机输出轴上的转动惯量。

$$J_1 = J \times \left(\frac{1}{720} \right) \approx 238 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2 \quad (2)$$

由公式(1)计算出转向步进电动机输出轴上的加速转矩为: $T_{a1} \approx 9.5 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 0.95 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

由于升降步进电动机和转向步进电动机的输入脉冲信号频率和加速时间一致,同理可估算出升降步进电动机输出轴上的惯量 $J_2 \approx 75 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ 。升降步进电动机输出轴的加速转矩 $T_{a2} \approx 3 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

因此转向步进电动机和升降步进电动机带载运行所需要的转矩分别为 $0.95\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $0.3\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

查阅资料,并考虑设计余量,选用 57BYGH8404、42BYGH5403 两相步进电机。

2.3 水平转向传动

跟踪器减速装置减速比较大,需要实现系统低速启动和精确的太阳跟踪,并能保证以小的力驱动大的负载;为避免在电机停转时受风力或者惯性的影响使步进电动机继续发生偏转或扭动,传动机构需具备自锁功能。鉴于以上因素,水平转动本设计选用的蜗轮蜗杆传动机构。考虑到本系统要求的传动比较大,需要自锁,取蜗杆头数 $Z_1=1$,根据传动需要采用左旋,取蜗轮头数 $Z_2=720$ 。即减速比 $i=720:1$,步进电动机转动一圈

时,水平方向相应转动 0.5° 。

(1)蜗杆用 45 钢,表面淬火,硬度 $45\sim 55\text{ HRC}$;蜗轮用铸锡青铜 ZCuSn10P1 ,砂模铸造,参数如下,

查表得:①许用接触应力 $[\sigma_H]=200\text{ MPa}$;②许用弯曲应力 $[\sigma_F]=50\text{ MPa}$ 。

(2)通过查阅相关机械设计手册并进行相关的机械设计计算,最终得到蜗轮蜗杆设计参数,如表 1 所示。包括蜗轮蜗杆的传动效率 η 、使用系数 K_A 、弹性系数 Z_E 、接触系数 Z_σ 、中心距 a 、模数 m 、蜗杆分度圆直径 d_1 、蜗轮分度圆直径 d_2 、蜗杆直径系数 q 、蜗杆导程角 λ 、步进电机的静力矩 T_1 、蜗轮齿根弯曲应力 σ_F 、蜗轮转矩 T_2 ^[13]。

(3)校核弯曲强度: $\sigma_F < [\sigma_F]$,弯曲强度满足要求。

表 1 蜗轮蜗杆设计参数

Table 1 Design parameters of worm and gear

η	K_A	Z_E	Z_σ	a/mm	m/mm	d_1/mm	d_2/mm	q/mm	$T_1/(\text{N}\cdot\text{m})$	$T_2/(\text{N}\cdot\text{m})$	$\lambda/^\circ$	σ_F/MPa
0.45	1.1	150	3.3	369	1	18	720	18	1.7	550.8	3.1798	46

2.4 竖直转向传动

根据太阳能自动跟踪器的功能要求,本文选用传动效率为 $0.30\sim 0.60$ 的传力螺旋,能够满足系统动力传递为主、用较小的转矩产生较大的轴向推力、工作速度不高及能够自锁的要求。当步进电动机转过 360° ,丝杠螺母转过一圈,丝杠行程 2 mm ,由此可得接收器倾角变化 0.1° 。

2.4.1 材料选择 本传动轻载、低速,螺杆材料选 45 钢, $\sigma_s=335\text{ MPa}$;螺母材料选铸锡青铜 ZCuSn10P1 , $[p]=11\text{ MPa}$;取单头右旋梯形螺纹,整体螺母, $\alpha=30^\circ$, $\beta=15^\circ$ 。

2.4.2 校核计算 查手册取公称直径 $d=12\text{ mm}$,螺距 $P=2\text{ mm}$,外螺纹小径 $d_3=d-2.5=9.5\text{ mm}$,内、外螺纹中径 D_2 、 $d_2=d-1=11\text{ mm}$,内螺纹大径 $D_4=d+0.5=12.5\text{ mm}$,内螺纹小径 $D_1=d-2=10\text{ mm}$ 。由这些数据进行查表和相关的计算,确定了丝杠螺母机构中的螺纹中径升角 λ 、螺纹的中径当量摩擦角 ρ_v 、螺母螺纹牙的弯曲强度 σ_b 和剪切强度 τ 、螺杆所受转矩 T 、螺杆许用应力 σ_{ca} 、螺母螺纹牙的许用弯曲应力 $[\sigma_b]$ 和许用剪切应力 $[\tau]$ 、螺杆许用应力 $[\sigma]$ ^[13]。这些参数的具体数值如表 2 所示。

表 2 丝杠螺母机构的校核参数

Table 2 Checking parameters of screw nut mechanism

$\lambda/^\circ$	$P_v/^\circ$	σ_b/MPa	τ/MPa	$T/(\text{N}\cdot\text{mm})$	σ_{ca}/MPa	$[\sigma_b]/\text{MPa}$	$[\tau]/\text{MPa}$	$[\sigma]/\text{MPa}$
3.32	5.71	0.71	0.31	140.7	2.47	40~60	30~40	71

- ①校核螺纹副自锁性: $\lambda \leq \rho_v$ 满足自锁条件。
- ②校核螺母螺纹牙强度: $\sigma_b \leq [\sigma_b]$ 、 $\tau \leq [\tau]$ 合格。
- ③校核螺杆强度: $\sigma_{ca} \leq [\sigma]$ 合格。

3 控制系统设计

3.1 太阳位置探测

该跟踪器的传感器示意布置图见图 3,圆筒形外壳的上部,东、南、西、北四个方向上分别安装 4 只光敏电阻 ^[14];其中 RG1、RG3 东西对称安装

在圆筒的两侧,用来粗略检测太阳由东往西运动的方位角;RG2、RG4 南北对称安装在圆筒两侧,用来粗略检测太阳的高度角;在圆筒内部,东、南、西、北四个方向上也分别布置 4 只光敏电阻;其中 RG5、RG7 东西对称安装在圆筒的内侧用来精确检测太阳由东往西运动的方位角;RG6、RG8 南北对称安装在圆筒的内侧,用来精确检测太阳的高度。该跟踪器对太阳的高度角和方位角进行双轴跟踪 ^[15]。

对方位角进行跟踪的原理:假设圆筒始终在

高度方向对准太阳,当太阳光线以与传感器板垂直的方向照射到传感器上,两组光敏电阻 RG1、RG3 和 RG5、RG7 接收到的光强相同,比较电路的输出值为零。当太阳光偏离垂直方向一个较小的角度时, RG1、RG3 这一对光敏电阻可能受环境散射光的影响,不会反映出太阳光线的变化;而 RG5、RG7 这一对光敏电阻受到了圆筒对环境散射光的屏蔽保护,它们接收的光强会出现差值而形成偏差信号。该信号经放大后送入控制单元去控制自动跟踪器调整太阳光接收器的角度,直到太阳光接收器对准太阳。高度角的跟踪基本原理及工作方式与之类同。

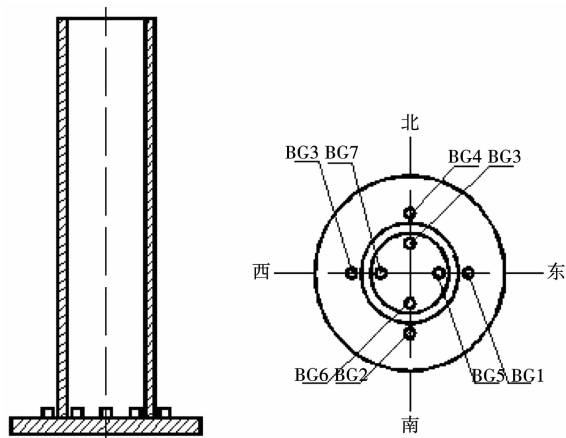


图 3 传感器示意布置

Fig. 3 Schematic layout of sensor

这样设置传感器位置的优点:设置了一个圆筒保护光敏电阻,屏蔽了外界环境的光线干扰,提高了跟踪精度。圆筒外的传感器在太阳光接收装置的主光轴与实际太阳光线偏离很远的时候能够发挥功能,解决了乌云、阴雨天气、日夜交替等对跟踪效果的影响。本设计选用 GL5516 型光敏电阻。考虑到制作、安装、占用空间等因素,光敏电阻与圆筒之间的距离取 2 cm。太阳平均每小时转动 15° ,为保证跟踪器至少 t min 转动一次,太阳每次转过 $(15n/60)^\circ$ 的角度,还可根据实际需要调整 t 值。如图 4 所示,当光敏电阻高 $L=2$ cm,光敏电阻与圆筒距离 $D=2$ cm, $t=10$ min 时,圆筒高 $H=L+D\times\cot(15/6)^\circ=47.8$ cm,圆筒内径为 40 mm。

3.2 信号处理与控制单元

光敏电阻将阳光强度的变化转变为电阻阻值的变化,由跟踪原理知,当两个光敏电阻的照度差(有正有负)较小或为零时,信号处理电路不输

出信号^[9];当两个光敏电阻的照度差达到一定数值时,信号处理电路应输出信号驱动太阳能接收器去跟踪。相应的信号处理电路如图 5 所示。

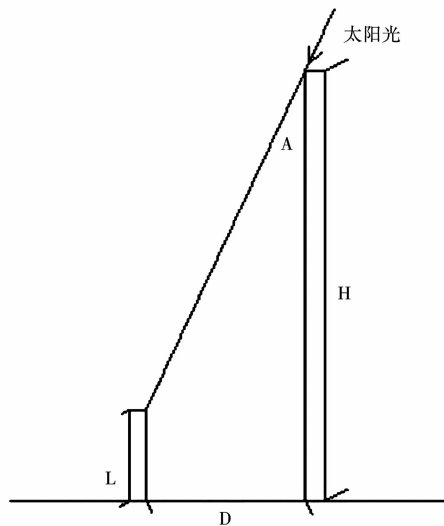


图 4 圆筒尺寸与光敏电阻安装位置

Fig. 4 Schematic layout of the installation position of the cylinder size and photosensitive resistance

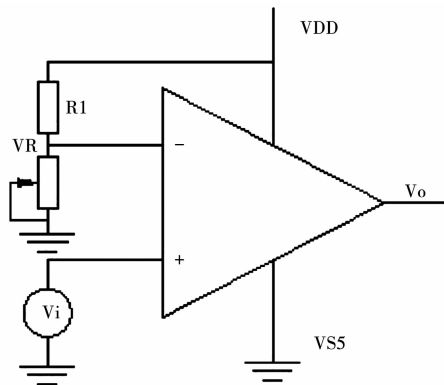


图 5 信号处理电路

Fig. 5 The signal processing circuit

参考电压 VR 加于信号处理电路的反相端,输入信号电压 Vi 加于比较器的同相端。VDD 和 VSS 为比较器的正、负电源。光敏电阻阻值的变化转化为输入信号电压 Vi 的变化,当输入信号电压 Vi 小于参考电压 VR 时,比较器输出电压 Vo 为 0;当输出信号 Vi 大于等于 VR 时,信号处理电路输出电压为 VDD。根据输入信号电压 Vi 随着阻值作线性变化的规律,得出信号处理电路的输入—输出波形如图 6 所示。

跟踪器的信号处理与控制电路图如图 7 所示。根据对信号处理电路的分析可知调整 RW1、RW2 和 RW3、RW4 可以控制产生输出信号所需

的光敏电阻照度差大小,以达到控制跟踪精度的目的,适当控制精度可避免电机频繁启动。为保护系统,设置光控开关,当光线达到一定强度时才接通电源,屏蔽干扰光。

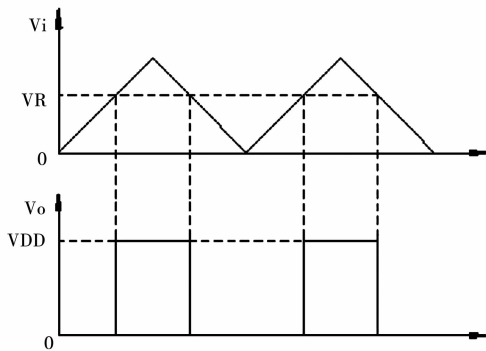


图 6 信号处理电路的输入-输出波形

Fig. 6 Input - output waveform of the signal processing circuit

其工作原理如下:以水平方向跟踪为例,跟踪范围之内,当光敏元件 RG1 接受到的光强(阳面)大于 RG3 接受到的光强(阴面),即电压比较器

U1A 输出高电平信号,电压比较器 U2A 输出低电平信号。此时,U2A 输出的低电平信号经过非门 U7 成为高电平信号,并与 U1A 输出的高电平信号经过与门 U9 后,输出高电平;与非门 U5 输出高电平信号,三极管导通,继电器 K1 导通,开关闭合,将与门 U9 输出的高电平送到步进电动机驱动器方向电平控制线,控制电机正传,跟踪器向东转动。当转动到一定的精度范围内,太阳偏离不太远时,与 RG1 并联的 RG7(暗筒屏蔽了环境散射光干扰)开始起主导作用,使暗筒精确对准太阳。当 RG1 接受到的光强(阴面)小于 RG3 接受到的光强(阳面)时,分析的方法同理。

跟踪范围之外,光敏元件 RG1 接受到的光强和 RG3 接受到的光强相差不大,即电压比较器 U1A 输出低电平信号,电压比较器 U2A 输出低电平信号;与非门 U5 输出低电平信号,三极管不导通,继电器 K1 不导通,开关断开,步进电动机驱动器方向电平控制线无信号输入,系统不进行跟踪。

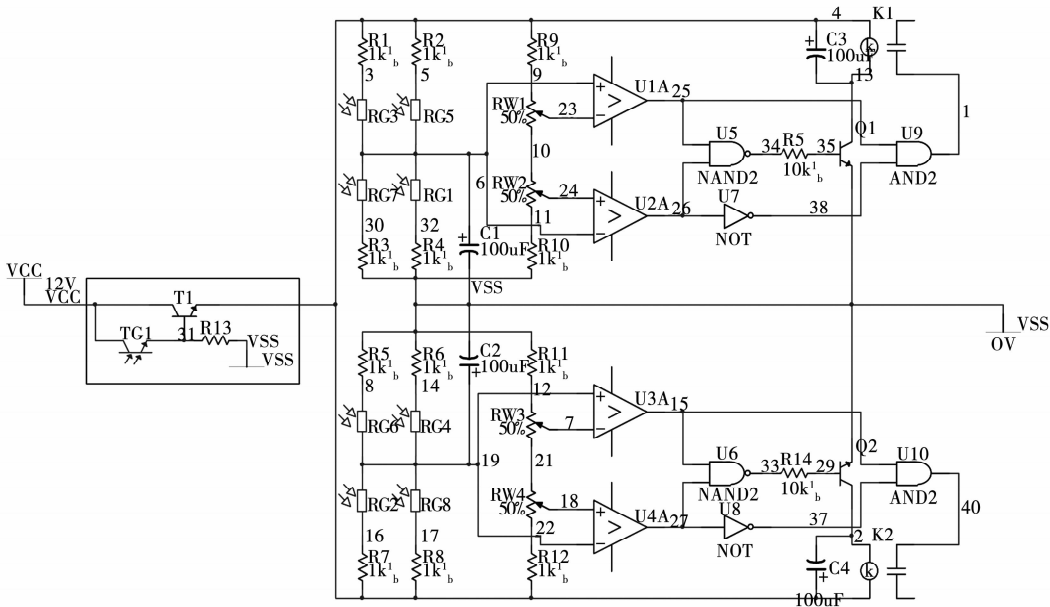


图 7 跟踪器的信号处理与控制电路

Fig. 7 Signal processing and control circuit of tracker

4 总结

本文设计的太阳能自动跟踪器,采用丝杠螺母传动机构和蜗轮蜗杆机构,具有很好的稳定性,并且能防杂光干扰。夜间,电路停止工作,阴天或太阳被云层遮挡时,该系统自动停止跟踪;云散日

出时,跟踪器能识别太阳方位,及时响应,实现对太阳的全天实时跟踪,提高了太阳能利用率,节约能源绿色环保,能被应用于各种太阳能农业设施中,突破能源使用限制,符合我国农业科技的发展与应用。

(下转第 118 页)

vulnerable sectors to climate change, any degree of climate change would have potential and significant effect on agricultural production and its related process. With the continuous development of global climatic change, abnormal meteorology is disadvantages on agricultural production. The current research on the effect of climate change about agricultural production is organized around agricultural growth potential, climate resources and environment, planting system and structure and so on. The effect of climate change was researched on thoroughly systematic about the key elements of agricultural production such as light, temperature, soil quality and water environment. Examination of these issues may provide insights into the impact mechanism between agrometeorological disasters and occurrence of crop pests. It was of great scientific and practical significance to analyze and simulate the impacts of climate change on agricultural production in China. Through literature review and comparative studies, the main research methods of the impact of climate change on agricultural production were discussed, and the impacts of climate change on agricultural production potential, agricultural production environment, cropping system and agricultural economy were discussed, at the same time, some current problems in these studies were also found, and some key scientific problems were proposed in the future study.

Keywords: climate change; agricultural production; agricultural disasters; cropping system

(上接第 111 页)

参考文献:

- [1] 孙岩, 徐晓辉, 苏彦莽, 等. 便携式土地墒情监测系统设计与[J]. 节水灌溉, 2016(6):102-104.
- [2] 刘柯楠, 吴普特, 朱德兰, 等. 基于 GPS 的太阳能平移式喷灌机自主导航系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16):89-94.
- [3] 李野, 董守田, 黄丹丹. 基于 ZigBee 技术的水稻自动灌溉控制系统设计[J]. 农机化研究, 2015(2):226-229.
- [4] 李俊瑞, 李凌琨, 陈传玮. 户用太阳能沼气池的研究与设计[J]. 可再生能源, 2015, 33(8):1219-1224.
- [5] 黄伟力, 边燕, 冯青春, 等. 基于 Cortex-M3 的农作物生长参数监测系统设计与[J]. 农机化研究, 2015(2):203-205.
- [6] 熊美东, 李就好, 田凯, 等. 基于太阳能供电的田间图像采集系统设计[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7):389-393.
- [7] 马质璞, 王玉吉, 刘宏伟. 基于太阳能蜈蚣养殖箱的研究及应用[J]. 机械设计与制造, 2015(8):121-123.
- [8] 肖德琴, 傅俊谦, 邓晓晖, 等. 基于物联网的桔小实蝇诱捕监测装备设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7):166-172.
- [9] 崔海朋, 张超辉. 基于 STM32 的嵌入式槽式太阳能热发电控制器设计[J]. 鲁东大学学报(自然科版), 2017, 33(2):122-126.
- [10] 喻志伟, 项安. 太阳能自动跟踪系统设计[J]. 机电一体化, 2015(11):50-54.
- [11] 李盛前, 杨晓京. 太阳能干燥器自动跟踪系统研究[J]. 微处理机, 2011, 32(6):70-72.
- [12] 刘松, 黄钱飞, 李仁浩, 等. 双轴液压式全景太阳能自动跟踪系统设计[J]. 机床与液压, 2015, 43(11):115-118.
- [12] 闻邦椿. 机械设计手册. 第 3 卷, 机械零部件设计, 轴系、支承与其他[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [14] 阿杰, 高金凤. 基于 STC15 的太阳能自动跟踪系统设计[J]. 制造业自动化, 2016, 38(12):101-103.
- [15] 彭喜英, 赵强松. 基于单片机 AD μ C812 的太阳能自动跟踪系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2015(1):150-152.

Design of Solar Energy Automatic Tracker

LU Qiang, SHI Ying-gang, LIU Li

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to make full use of solar energy, the mechanical part and the control part of solar energy automatic tracker were designed. The structure, working principle, performance characteristics, tracker contains, sun position detection unit, signal processing, control unit and power unit in detail was introduced. The mechanical implementation structure diagram and the control circuit diagram were also drawn. The light signal acquisition module feed back the illumination intensity to the control module. According to the illumination intensity, signal control module, on-off of relay and the rotation of step motor, the horizontal and pitch control of solar energy automatic tracker was realized. As a result, solar receiver always remained the facade towards the sun to increase the effect of solar energy absorption.

Keywords: solar energy; automatic tracking; photosensitive resistance; dual-axis tracking