

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2010.05.009

太阳绝对辐照度测量系统中的太阳跟踪系统 设计与性能测试

孔德新, 郑小兵, 吴浩宇, 邹鹏

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为实现高精度的太阳绝对辐照度观测, 设计了视日运动轨迹跟踪和四象限探测器精密跟踪相结合的太阳自动跟踪系统。分析了四象限探测器的工作原理, 对其均匀性进行了测试, 确定了其偏离系数。对跟踪系统进行了硬件设计、控制软件设计和结构设计。实现了以 C8051F064 单片机为核心的数据采集、信号处理和反馈控制系统。在实验室内对系统的跟踪精度进行了测试, 结果表明跟踪偏差在 0.1° 之内。经实际运行证明, 该系统方案可行, 具有稳定性强、精度高的优点。

关键词: 太阳辐照度; 太阳跟踪; 四象限探测器

中图分类号: TK513.4

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2010)05-0390-09

Design and Test of Sun-Tracking System in the Observation System of Solar Irradiance

KONG De-xin, ZHENG Xiao-bing, WU Hao-yu, ZOU Peng

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to realize the highly accurate observation of solar irradiance, an automatic sun-tracking system was designed by using solar motion trajectory tracking and four quadrant detector tracking. The working principle of four quadrant detector was analyzed and the uniformity were tested. The deviation of the quadrant detector was measured. The hardware, software and structure design of the system were accomplished. The system using for data acquisition, signal processing and feedback control as C8051F064 was realized. The tracking precision of the system was tested in the laboratory and the results showed that the tracking deviation was less than 0.1° . The system ran successfully in practice. The scheme of system was proved to be stable and highly precise.

Key words: solar irradiance; sun-tracking; four quadrant detector

收稿日期: 2010-02-02; 修改日期: 2010-03-02

基金项目: 国家 863 计划 (2007AA12Z106) 资助

E-mail: dxkong@aiofm.ac.cn

1 引言

太阳辐射是影响地球大气动力学、海洋动力学和全球能量平衡的决定性因素。太阳辐射的高精度观测已被空间遥感、深空探测、辐射定标等领域作为迫切需要解决而又最具有挑战性的研究任务之一。太阳辐射的相对变化幅度很小, 一个 11 年的太阳周期内约变化 0.1%, 这样微小的变化已被认为是厄尔尼诺等全球气候现象的主要原因之一。这对太阳绝对辐照度的观测提出了极高的精度要求, 一般要求观测设备的绝对不确定度达到 10^{-4} 量级^[1]。开展高精度的太阳辐射观测, 可以为我国制定长期的社会发展和环境保护规划、提高中长期数值气象预报的准确性、预防和减小气候变化不利影响提供科学依据。

在太阳绝对光谱辐照度观测设备的研制中, 高精度的太阳跟踪系统是关键环节之一, 其跟踪精度直接影响辐照度的测量不确定度。目前作者单位在研太阳光谱辐照度观测仪的预期绝对不确定度为 5×10^{-4} , 实现这一不确定度需要综合考虑观测系统多个环节的不确定度贡献, 其中太阳跟踪所引起的不确定度应当优于 1.5×10^{-4} , 它是由太阳对准的角度不确定度引起的 (如图 1 所示)。

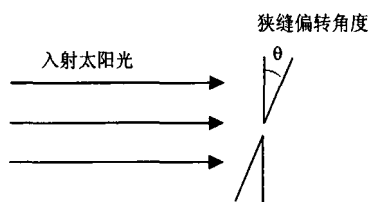


图 1 太阳跟踪精度对光谱辐照度测量的影响示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sun-tracking precision and its impact on the observation of solar irradiance

在太阳光谱辐照度观测仪进行光谱辐照度测量时, 认为入射的太阳光是平行光, 相当于测量的是入射矩形狭缝内的光, 由自动跟踪系统保证入射狭缝始终对准太阳。当自动跟踪系统有角度为 θ 的跟踪误差时, 那么狭缝就比正对时偏转了 θ 角, 对应接受光的面积变为原来的 $\cos\theta$ 倍。根据 1.5×10^{-4} 的跟踪精度不确定度, 公式可写为

$$\frac{E - E'}{E} = 0.00015\%, \quad (1)$$

式中, E 为完全对准时接收的光辐照度; E' 为实际接收的辐照度且 $E' = E \times \cos\theta$, 计算得 $\theta = 0.1^\circ$, 即高精度太阳辐射观测要求太阳跟踪系统的跟踪精度须达到 0.1° 。

太阳自动跟踪的方法有多种, 在对跟踪精度要求不高的场合常使用的是机械式的跟踪器, 以视日运动轨迹跟踪系统最为代表。这是一种主动式的跟踪器, 有单轴和双轴两种形式^[2]。它根据太阳在天空中每 min 的运动角度, 计算出太阳光接收器每 min 应转的角度, 从而确定出电动机的转速, 使得太阳光接收器根据太阳的位置而相应变动。其中, 太阳高度角 (h_θ) 的计算公式为^[3]

$$\sin h_\theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \tau. \quad (2)$$

太阳方位角 (A) 的计算式为

$$\cos A = (\sin h_\theta \sin \phi - \sin \delta) / \cos h_\theta \cos \phi. \quad (3)$$

式中, δ 是太阳赤纬角; ϕ 为当地的地理纬度; τ 为当时的太阳时角。视日运动轨迹跟踪系统的特点是电路简单, 但由于时钟累积误差不断增加, 系统的跟踪精度很低。

为实现高精度的太阳跟踪, 常在机械式跟踪器上加光电探测器, 由光电探测器接受太阳光, 根据太阳光斑在探测器上的偏移产生一定值的微电流, 作为偏差信号, 经放大电路放大, 由伺服机构调整角度使跟踪装置对准太阳完成跟踪。由于采用了闭环反馈的跟踪机制, 使跟踪精度大大提高。目前国内用于大气气溶胶观测的太阳辐射计大多采用了光电跟踪方法, 一些典型仪器的太阳跟踪方法如表 1 简述。

本文依据太阳光谱绝对辐照度测量仪的具体要求, 采用了视日运动轨迹跟踪和四象限探测器精密跟踪相结合的太阳跟踪设计方案, 完成了太阳跟踪系统的研制, 经测试表明该系统稳定性强、精度高。

表 1 各型号太阳辐射观测设备太阳跟踪方式比较

Table 1 Comparison of sun-tracking methods of some equipments used to observe solar irradiance

型号	SIMBAD 太阳辐射计	CE-318 太阳辐射计	SPUV-6/10 太阳辐射计	ISI822 细分光谱太阳辐射计
太阳跟踪方式	将四象限的硅探测器放在主光学元件下实现太阳跟踪; 同时在光学头部还装了一个广视场的 CCD 相机	由双轴步进马达系统构成, 由时间方程来控制太阳的初步跟踪, 用四象限探测器系统作精密跟踪	安装在一个提供给用户的太阳跟踪转台上, 保持直接指向太阳	由二维自动太阳跟踪平台执行跟踪, 跟踪平台可由控制程序完成太阳的自动寻找, 并由四象限探测器完成精密跟踪

2 太阳跟踪系统设计

系统采用视日运动轨迹跟踪和四象限探测器精密跟踪相结合的方式, 先由视日运动轨迹跟踪方式实现太阳的初步跟踪, 再由四象限探测器实现精密跟踪。其中, 视日运动轨迹跟踪方式是通过太阳参数的天文计算公式算出太阳的高度角和方位角, 再通过单片机带动二维转台机构实现跟踪的。四象限探测器精密跟踪方式是将四象限探

测器安装在前置光阑筒后, 再将此装置固定于二维旋转台上。当太阳在探测器上生成的光斑不在中心时, 四个象限产生偏差电流, 经前置放大电路后被单片机采集, 单片机将采集到的四路信号进行算法处理, 得出需要调整的发给步进电机的脉冲数和方向, 从而带动二维转台转动, 调整高度角和方位角, 使探测器重新对准太阳。系统组成示意图如图 2 所示。

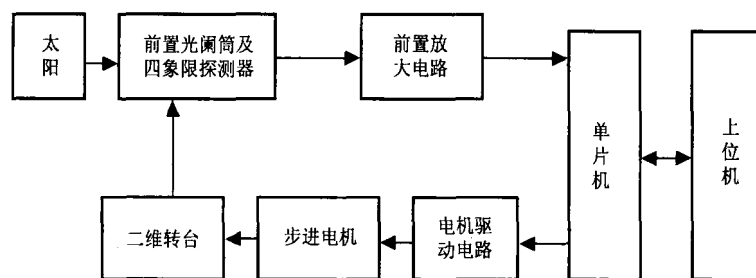


图 2 太阳跟踪系统组成示意图

Fig.2 Schematic diagram of sun-tracking system

2.1 四象限探测器的选择及性能分析

2.1.1 探测器工作原理

四象限光电探测器实际是由四个光电探测器构成, 每个探测器一个象限, 目标光信号经光学系统后在光电探测器上成像。一般将四象限光电探测器置于光学系统焦平面上或离开焦平面。当目标成像不在光轴上时, 四个象限上探测器输出的光电信号幅度不相同, 比较四个光电信号的幅度大小就可以知道目标成像在哪个象限上^[4]。

四象限中心与直角坐标系的零点 o 重合。图

3 中四象限的对称轴分别与坐标的 x 、 y 轴重合。成像光斑的半径为 r , 光斑中心为 o' , 当 o' 位于四象限中心时, 四个象限上接收到的光信号强度相等。当 o' 逐渐偏离 o 时, $|E_r|$ 逐渐增大。图中 E_x 、 E_y 分别代表 E_r 在 x 、 y 方向上的分量。根据不同的应用目的, 光斑半径 r 相对于四象限光敏区半径 R 存在一个最佳值 r_{opt} 。对大多数应用场合可以取 $r_{opt} = 0.5R$ 。

不同的计算方法可以得到不同结果。首先假设光斑分布是均匀的。在这种条件下四象限得到

的信号就仅取决于光斑投射在其上的面积。

四象限加减求解法, 求解公式为

$$E_x = \frac{S_D + S_C - S_B - S_A}{S_A + S_D + S_B + S_C}, \quad (4)$$

$$E_y = \frac{S_B + S_C - S_A - S_D}{S_A + S_D + S_B + S_C}, \quad (5)$$

式中, S_A 、 S_B 、 S_C 、 S_D 分别代表光斑在探测器四个象限上的面积; E_x 、 E_y 代表误差信号在 x 轴、 y 轴上的分量。在这种算法中, 在 o' 偏离坐标 o 点的距离 $a \leq 0.6r$ 的范围内, E_x 、 E_y 曲线有良好的线性^[5]。

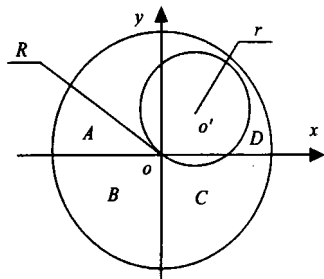


图 3 四象限探测器与光斑

Fig.3 Four quadrant detector and spot

公式中的面积与电压相对应, E_x 、 E_y 对应着四象限探测器的两路信号 V_x 、 V_y

$$V_x = \frac{V_D + V_C - V_B - V_A}{V_D + V_C + V_B + V_A}, \quad (6)$$

$$V_y = \frac{V_B + V_C - V_D - V_A}{V_D + V_C + V_B + V_A}, \quad (7)$$

V_x 、 V_y 与探测器上光斑中心偏离探测器中心的距离 L 有线性关系

$$L = KV + C, \quad (8)$$

式中, K 为比例系数; C 为常数。 K 和 C 可作为偏离系数。

在两个方向上的偏离系数公式为

$$L_x = K_x V_x + C_x, \quad (9)$$

$$L_y = K_y V_y + C_y. \quad (10)$$

2.1.2 探测器的选择

所需考虑的探测器的参数有: 工作面积、暗电流、等效噪声功率、响应时间和工作温度。

如图 4 所示, 太阳光经小孔光阑后在四象限探测器上形成光斑。对小孔光阑的要求: 由于太阳直接辐射信号较强, 小孔光阑开孔不宜过大, 以免信号过载, 影响跟踪精度; 小孔也不宜过小, 否则需要考虑衍射作用。太阳光斑的大小由太阳张角和筒长决定, 太阳张角为 0.573° , 根据前面对四象限光电探测器原理的分析, 要求太阳光斑的直径约为探测器工作面直径的一半左右。结合探测器的工作原理, 希望暗电流、等效噪声功率越小越好。探测器需长期在户外工作, 所以工作温度范围应包含户外温度的变化范围。由于探测器只是跟踪太阳, 外界环境变化不剧烈, 所以对响应时间、电容等没有特别的要求。

根据以上条件, 选用的探测器是 Pacific Silicon Sensor 公司的 QP50-6-TO8 四象限探测器, 其性能指标如表 2 所示。

表 2 QP50-6-TO8 四象限探测器性能指标

Table 2 Performance indexes of QP50-6-TO8 four quadrant detector

产品	Pacific Silicon Sensor QP50-6-TO8
工作面积 (mm^2)	4×11.76
响应率 (A/W)	0.64 (900 nm)
电容 (pF)	25
暗电流 (nA)	2.0
响应时间 (ns)	40
温度范围 ($^\circ\text{C}$)	-40 ~ 100

2.1.3 一致性分析及测量

在使用四象限光电探测器的时候, 一个很重要的指标就是要求探测器四个象限的一致性要好, 包括光响应度、感光面积、暗电流和结电容等参数, 这些参数将直接影响测量和定位精度。其中最重要的一个参数就是光响应度的一致性。它包括两个方面, 象限内不同位置响应的不一致和象限间的光电响应不一致。前者是由制作器件的半导体晶体生长缺陷、衬底掺杂组分的不均匀、掩膜误差引起的, 后者除此之外, 还受探测器各象限的前置放大增益不一致的影响^[6]。

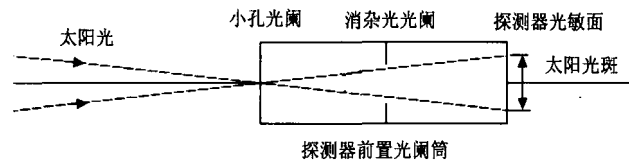


图4 小孔成像示意图

Fig.4 Schematic diagram of pinhole imaging system

四象限光电探测器由 A 、 B 、 C 、 D 输出, 信号强度分别为 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 。理想情况下, 这四个信号大小应该相等, 它们之间的差别体现了四个象限的响应度不一致性。先考虑任意两个象限 i 和 j 的响应不一致性 $d_{i,j}(i, j = A, B, C, D)$, 用式 (11) 表示

$$d_{i,j} = \frac{2|V_i - V_j|}{V_i + V_j} (i, j = A, B, C, D), \quad (11)$$

则整个四象限探测器的象限响应不一致性为所有 $d_{i,j}$ 的均方根, 即

$$d_k = \sqrt{\frac{d_{A,B}^2 + d_{A,C}^2 + d_{A,D}^2 + d_{B,C}^2 + d_{B,D}^2 + d_{C,D}^2}{6}}. \quad (12)$$

实际测量中, 每测一组 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 可求得一个 d_k , 为了测量的准确, 需测量多组数据, 将多个 d_k 求平均作为探测器象限响应不一致性 d

$$d = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_k. \quad (13)$$

四象限光电探测器象限响应一致性定义为

$$\alpha = 1 - d = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_k. \quad (14)$$

将四象限探测器用黑布遮住, 使其完全没有光入射进去, 测量四个象限输出的电压值。 A 、 B 、 C 、 D 四个象限的电压值分别为 0.54 mV、1.37 mV、1.82 mV、2.28 mV。这四个电压值即由各个象限的暗电流引起的, 作为本底噪声在以后的测量中应当扣除。用卤钨灯作为光源, 探测器距离灯 1.5 m, 探测器正对着卤钨灯, 探测面与

两者之间的连线垂直。卤钨灯和探测器周围的物品用黑布遮住, 以消除杂散光的影响。打开卤钨灯, 用数据采集器同时采集四路输出的电压值。整个四象限探测器的象限响应不一致性为 d_k , 根据公式 (13), 将卤钨灯的工作状态设定在 6.65 V, 2.86 A, 其功率为 19.02 W, 采集 30 次数据, 测量四个象限的输出电压 (扣除暗电流后) 以推算出 d_k , 将 d_k 取平均值, 得 $d=0.007287$ 。四象限光电探测器象限响应一致性为 99.27%。

2.1.4 偏离系数的确定

依据式 (9) 和 (10), 为了得到光斑偏移距离和探测器输出电压之间的关系, 需要确定 K 和 C 。制作小孔光阑, 小孔的直径为探测器工作面积直径的一半 (即为 0.39 mm)。将探测器中心对准小孔中心并紧贴光阑放置, 远处用卤钨灯照明, 可近似看为点光源。探测器置于二维平移台上, 改变探测器位置, 测四路的输出电压值。

将卤钨灯的电压调在 8.70 V, 工作电流 3.29 A, 总功率为 28.62 W, 二维平移台由步进电机控制箱控制, 控制箱每发出 400 个脉冲, 平移台移动 1 mm。先将探测器水平移动, 每次移动 0.1 mm, 即探测器从原点沿 x 轴移动, 每移动一次距离, 测量一次四个电压值。采用四象限加减求解法, 在这种情况下, 求解公式为式 (6)。将四个象限上测得的电压值扣除象限本身的暗电流, 带入公式 (6), 得出 V_x 与偏离原点的水平距离 L_x 的对应关系如图 5 所示。 L_x 与 V_x 成线性关系, 用直线拟合的方式可求出 K_x 和 C_x 。 $K_x = 1.92$, $C_x = -0.09$ 。

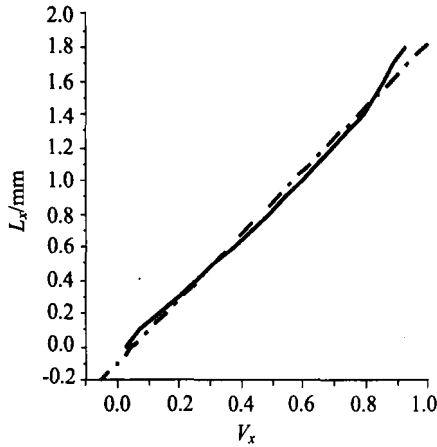


图 5 V_x 与 L_x 对应关系

Fig.5 Corresponding relation between V_x and L_x

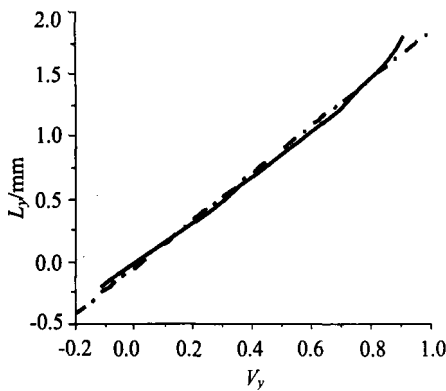


图 6 V_y 与 L_y 对应关系

Fig.6 Corresponding relation between V_y and L_y

按照同样的方式将探测器垂直移动, 探测器从原点沿 y 轴移动, 同样采用四象限加减求解法, 求解公式为式 (7)。将四个象限上测得的电压值扣除象限本身的暗电流, 带入以上公式 (7), 得出

V_y 与偏离原点的垂直距离 L_y 的对应关系如图 6 所示。 L_y 与 V_y 成线性关系, 用直线拟合的方式可求出 K_y 和 C_y 。 $K_y = 1.89, C_y = -0.05$ 。

2.2 控制系统硬件设计

控制系统硬件原理框图如图 7 所示。

2.2.1 前置运放电路

为提高探测器的信噪比, 改善稳定性, 应选取输入偏置电流尽可能小、输入噪声电压尽可能低且温度特性较好的运放。

选用如图 8 所示的 $I-V$ 变换电路, 其中四个象限都使用相同的光电探测电路, 放大器选用 AD820, 反馈电阻选用 $100\text{ k}\Omega$ 的精密电阻。

2.2.2 C8051F064 单片机

C8051F064 是 Silicon Laboratories 公司推出的完全集成的混合信号片上系统型单片机。该单片机内核采用流水线结构, 速度可达 25 MIPS(25 MHz 晶振), 比普通的 51 单片机快 10 倍, 其指令与标准系列 51 单片机兼容, 因而掌握开发过程非常容易; 该芯片的 JTAG 调试方式支持在系统、全速、非插入调试和编程, 且不占用片内资源, 在调试时所有的模拟和数字外设都可全功能运行 [7]。

其片内集成的两个 16 位分辨率的 SAR 型 ADC, 最高采样速度可达 1 Msps, 满足对高精度跟踪的要求。这样就无需扩展片外高精度 ADC, 不仅降低了成本, 而且大大简化了硬件电路, 同时也提高了系统的抗干扰能力。

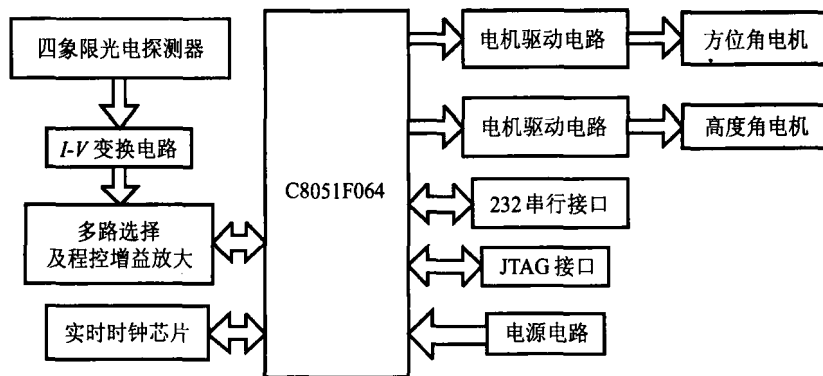


图 7 硬件原理框图

Fig.7 Schematic diagram of hardware design

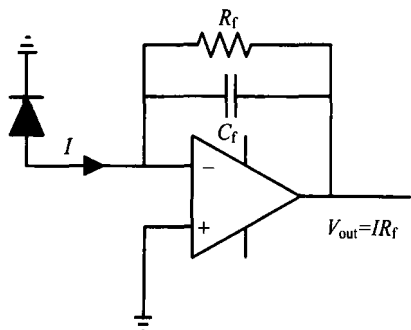


图 8 I - V 变换电路原理图

Fig.8 Schematic diagram of I - V transform circuit

2.2.3 步进电机驱动模块

步进电机驱动电路是由 L297 和 L298 组成。L297 是步进电机控制器，适用于双极性两相步进电机或单极性四相步进电机的控制，可有半步、整步和波状三种驱动模式，仅需时钟、方向和模式输入信号。L298 是内含两个 H 桥的高电压大

电流双全桥式驱动器，接受标准 TTL 逻辑电平信号，可驱电压 46 V、每相 2.5 A 及以下的步进电机。使用 L297 和 L298 可以作成两相双极性的步进电机驱动电路，它是采用定电流方式驱动，每相电流峰值可达 2 A。具有元件少、可靠性高、占用空间少、装配成本低等优点，通过软件开发，还可简化和减轻 CPU 的负担。

2.2.4 实时时钟模块

当系统执行供视日运动轨迹跟踪时，单片机内部计算太阳高度角和方位角需要得到系统实时时间，实时时钟模块可实现此功能。选用内置晶振、充电电池，时钟精度高的时钟芯片，这样不但简化了硬件电路，还免去了时间初始化程序，满足系统跟踪精度要求。SD2405AL 是一种内置晶振、充电电池、具有标准 IIC 接口的芯片，CPU

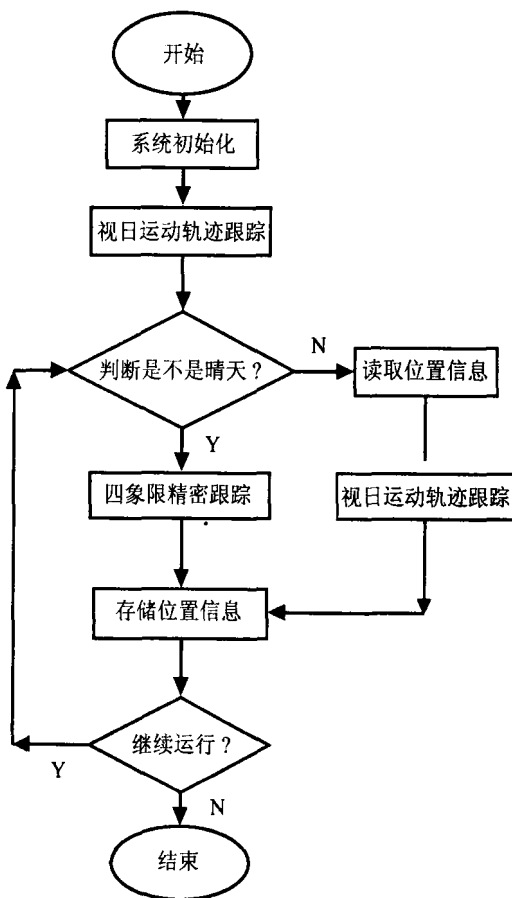


图 9 系统程序流程图

Fig.9 Flow chart of system program

可使用该接口通过 5 位地址寻址来读片内 32 字节寄存器的数据。该芯片可保证时钟精度为 5 ppm, 即年误差小于 2.5 min。内置充电电池、充电电路和电源切换电路, 当芯片检测到主电源 VDD 掉到充电电池电压以下, 芯片会自动转为由充电电池供电。

2.3 控制系统软件

系统程序流程图如图 9 所示, 采用视日运动轨迹跟踪和四象限探测器精密跟踪相结合的方式。

太阳轨迹位置由观测点的地理位置和标准时间来确定。将观测点的经纬度写入控制系统的程序中, 控制系统通过实时时钟芯片读取当地时间, 并通过太阳参数的算法公式自动运算出太阳的高度角和方位角, 然后根据太阳轨迹一定时间的角度变化发送驱动信号, 实现跟踪装置二维转动的角度和方向变化, 调整光路对准太阳。系统初始化时, 采用这种方式实现太阳的初步跟踪。在晴天情况下, 探测器接收的光为准平行光, 可由探测器装置实现精密跟踪。当天气不好时, 探测器接收的光全为散射光, 没有平行光, 无法用四象限探测器精密跟踪方式工作, 还是采用视日运动轨迹跟踪的方式。

2.4 太阳跟踪系统结构设计

根据小孔成像原理, 光阑筒前端小孔直径为 2 mm, 四象限探测器的前放电路板置于光阑筒后的屏蔽盒中。光阑筒中装有光阑, 以抑制来自探

测器的反射光及杂散光的影响, 光学通道内壁采用发黑处理。

二维转台由转动支架和电控转台组成, 其中转动支架的底板固定于水平方向电控转台上, 侧板固定垂直方向电控转台, 上面再安装前置光阑筒。这样, 通过控制两个方向电控转台, 便可实现控制系统对方位角和高度角的调整, 进而实现太阳的精密跟踪。

3 跟踪系统的性能测试

将 He-Ne 激光器置于一维电控平移台上并调整激光束使其水平, 光束前摆放太阳跟踪系统, 激光器前端距离光阑筒前端 1000 mm, 调整前置光阑筒使四象限探测器四路输出基本一致, 此时可认为激光正入射, 将激光器此刻位置记为原点。通过激光器垂直于光束方向的移动来模拟太阳的位置变化, 由于入射光足够远, 激光器的小范围水平平移可认为是入射光角度的变化, 入射角可近似等于平移距离与激光束长度的比值。

激光器波长为 594 nm, 功率 1 mW, 发散角 ≤ 2 mrad, 在四象限探测器位置处的光斑直径为 3 mm, 与太阳在探测器上的成像大小相当。探测器接收的激光功率低于太阳光功率, 但都在 mW 量级。用电控平移台控制激光器的平移, 使入射光角度发生变化, 跟踪系统可进行自动跟踪, 通过读取系统发给方位角电机的脉冲数可推知系统的

表 3 跟踪系统性能测试

Table 3 Test of the tracking system performance

激光器平移距离 (mm)	光入射角度变化	系统转动角度	跟踪偏差
+0.5	0.028°	0.015°	0.013°
+1	0.057°	0.038°	0.019°
+1.5	0.086°	0.123°	0.037°
-0.5	0.028°	0.059°	0.031°
-1	0.057°	0.084°	0.027°
-1.5	0.086°	0.148°	0.062°

转动角度, 将其与入射光的角度变化相比较, 其差异可作为系统跟踪精度的一种评估。实验结果如表 3 所示。由表 3 可看出, 系统跟踪偏差在 0.1° 之内, 满足系统设计要求。

4 小 结

根据高精度太阳辐射观测技术对太阳自动跟踪系统的要求, 设计了视日运动轨迹跟踪和四象限探测器精密跟踪相结合的跟踪方式。完成了对系统中核心部件四象限探测器性能的测试, 用 C8051F064 单片机实现了低成本太阳跟踪系统, 稳定性强, 精度较高, 适用于高精度的太阳辐射观测系统。

参考文献:

- [1] Harder J, Lawrence G M, Rottman G, et al. Solar spectral irradiance monitor [J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 415-418.
- [2] Sun Yinyin, Bao Jianbin, Wang Fan. Research of automatic sun-tracking device [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005, (7): 157-159(in Chinese).
孙茵茵, 鲍剑斌, 王 凡. 太阳自动跟踪器的研究 [J]. *机械设计与制造*, 2005, (7): 157-159.
- [3] Wang Bingzhong. Lecture on calculation of solar irradiance [J]. *Solar Energy*, 1999, (2): 8-9(in Chinese).
王炳忠. 太阳辐射计算讲座 [J]. *太阳能*, 1999, (2): 8-9.
- [4] Wang Dai, Yang Shihong. Double-axis tracking control techniques based on four-quadrant detector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(5): 31-37(in Chinese).
王 岱, 杨世洪. 采用四象限探测器的双轴跟踪控制技术 [J]. *光电工程*, 2003, **30**(5): 31-37.
- [5] Feng Longling, Deng Renliang. Study on optical tracking with four-quadrant photodetector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1996, **25**(1): 16-21(in Chinese).
冯龙龄, 邓仁亮. 四象限光电跟踪技术中若干问题的探讨 [J]. *红外与激光工程*, 1996, **25**(1): 16-21.
- [6] Dang Liping, Liu Junhua, Tang Shugang. Analysis of the non-uniform effect and soft correction algorithm for four-quadrant detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 541-544(in Chinese).
党丽萍, 刘君华, 唐树刚. 象限探测器非均匀性的影响分析及软校正算法 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 541-544.
- [7] Silicon Laboratories. C8051F0x Data Sheet [DB/OL]. 2008-01. www.Silabs.com.

作者简介: 孔德新 (1985-), 男, 山东聊城人, 硕士, 主要研究方向为光电检测。