

文章编号: 1672-8785(2017)07-0001-05

十字差动式小视场超高精度 太阳敏感器

朱振涛^{1,2} 席红霞¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 设计了一种专门用于对日观测成像稳像系统的超高精度太阳敏感器。针对传统的四象限太阳敏感器的不足, 设计了一种基于十字差动式太阳硅光电池的探测器, 以提高灵敏度和抗干扰能力。该系统在有效视场 (1°) 内具有 $10''$ 的低误差。

关键词: 太阳成像; 高精度太阳敏感器; 十字式硅光电池片; 角秒级

中图分类号: V4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.07.001

Cross-type Differential Ultra High Precision Solar Sensor with Small Field

ZHU Zhen-tao^{1,2}, XI Hong-xia¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A high-precision solar sensor specially used for image stabilization systems of solar-observing is designed. In view of the shortcomings of traditional four-quadrant solar sensors, a detector based on cross-type silicon photovoltaic solar cells is designed in order to improve the sensitivity and anti-jamming capability of the sensor. The sensor has a low error of 10 arc seconds in the effective field of view (1°).

Key words: solar-observing; high-precision solar sensor; cross-type silicon photovoltaic cell; arc-second level

0 引言

为了确定飞行姿态, 几乎每个航天器都会采用太阳敏感器。太阳敏感器通常可以分为基于光电池光伏特性的模拟式太阳敏感器^[1]和基于有源像素传感器 (Active Pixel Sensor, APS) 的数字式太阳敏感器两种。经过几十年的发展, 目前高精度太阳敏感器一般都是将电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 和互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconduc-

tor, CMOS) 作为 APS 的数字式太阳敏感器^[2]。其中, 基于 CCD 的数字式太阳敏感器在大视场下已可实现 0.01° 的定姿精度, 其在小视场下的精度也可达角秒级。但是它对体积、质量和功耗等要求较高, 同时 CCD 的成像速度较慢, 无法满足高实时性姿态调整的需求。另一方面, 虽然基于 CMOS APS 的太阳敏感器在价格、功耗、集成度以及信号读取等方面均优于基于 CCD APS 的太阳敏感器, 但是国内却尚未研制出基于 CMOS

收稿日期: 2017-03-10

作者简介: 朱振涛 (1992-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为太阳敏感器。

E-mail: billow.z@outlook.com

APS 的具有角秒级超高精度的太阳敏感器。

虽然在常规的航天器姿态控制中, 现有的精度为 0.01° 的太阳敏感器已经够用, 但是在用于对日观测的空间望远镜系统中, 则需要超高的定姿精度。地日平均距离在天文学中被用作距离单位, 称为一个天文单位 (1.5×10^{11} m)。太阳表面耀斑的直径约为 1×10^7 m, 则其观测角度约为 $13''$ 。太阳的直径为 1.4×10^9 m, 则其观测角度约为 $32'$ 。如果以太阳表面细节为主要观测对象进行观测的话, 那么望远镜的角度定姿就需要达到角秒级精度。同时, 由于太阳在航天器自身坐标系中的角度小于 0.5° , 用角秒级太阳敏感器进行更高精度的测量便成为了可能。目前, 国外已经在用于对日观测的太阳敏感器方面取得了相当多的研究成果。美国分别于 1998 年和 2010 年发射的太阳过渡区与日冕探测器 (Transition Regions and Coronal Explorer, TRACE) 和太阳动力学天文台 (Solar Dynamics Observatory, SDO) 两个太阳观测航天器上都搭载了超高精度的太阳敏感器^[3-4]。其中, TRACE 探测器载太阳望远镜的口径为 30 cm, 视场为 $8.5'$, 空间分辨率达到 $1''$ 。为了实现高精度成像, 该卫星上搭载的姿态控制系统和图像稳定系统能够将卫星抖动控制在 $20''$, 太阳敏感器的精度也达到了角秒级。

在此背景下, 本文设计了一种专门用于对日观测稳像系统的小视场、超高精度 (角秒级) 太阳敏感器。

1 系统设计及工作原理

1.1 传统四象限模拟太阳敏感器设计

图 1 为传统四象限模拟太阳敏感器的示意图。四象限光电探测器在高分辨率的位移偏差测量、激光准直和对准控制等方面具有广泛应用^[5]。基于四象限太阳能电池片^[6]的模拟式太阳敏感器不仅具有普通模拟式敏感器的优点, 而且还能够显著提升性能参数。

但是在这种设计中, 由于遮光罩全部投影在硅光电池片上, 利用光线在电池片上的照射面积即可计算出太阳入射角。这种设计对遮光罩的加工水平提出了很高的要求, 即遮光罩的直角部分必须具有尽可能少的倒角; 同时对加工组装的精度要求较高。如果遮光罩与电池片的中心不对齐的话, 那么就需要在后续处理中对其进行补偿。

1.2 十字式模拟太阳敏感器设计

针对传统四象限模拟太阳敏感器的缺点, 本文采用十字式电池片布局差动的方式进行设

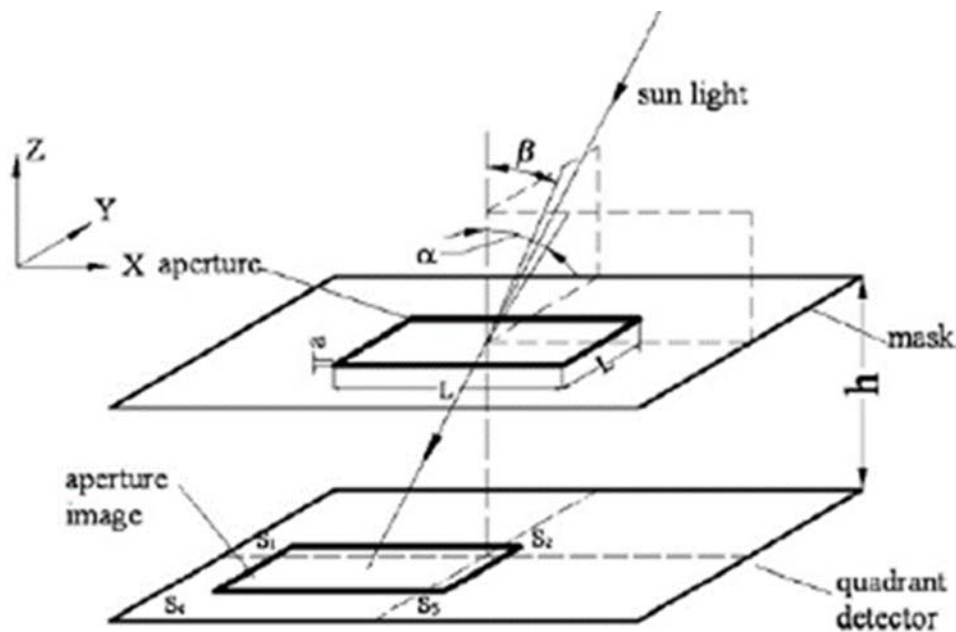


图 1 传统的四象限模拟太阳敏感器的示意图

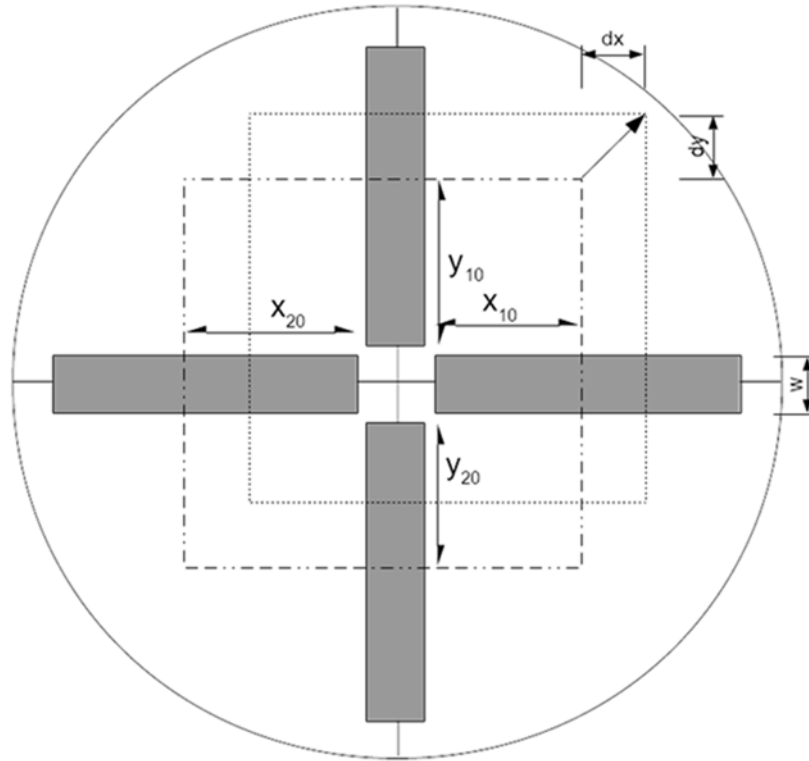


图 2 十字式电池片的摆放示意图

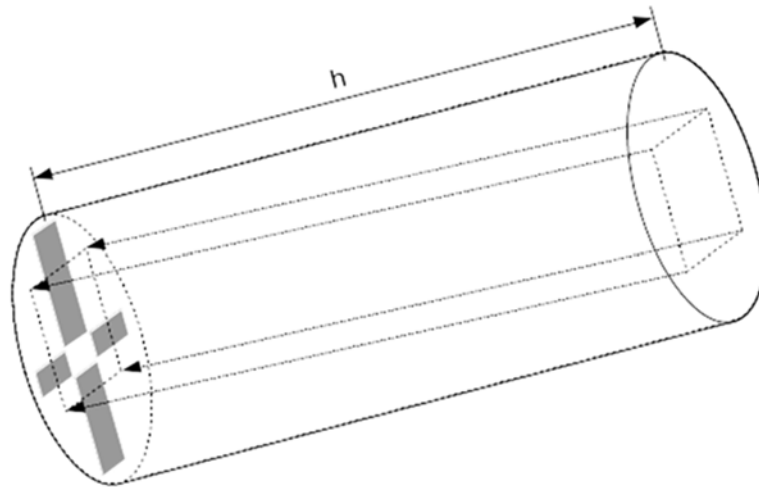


图 3 太阳传感器的整体结构

计。图 2 为十字式电池片的摆放示意图。其中，四块电池片的输出电流分别为

$$I_1 = (x_{10} + dx) \cdot w \cdot \mu \quad (1)$$

$$I_2 = (x_{20} - dx) \cdot w \cdot \mu \quad (2)$$

$$I_3 = (y_{10} + dy) \cdot w \cdot \mu \quad (3)$$

$$I_4 = (y_{20} - dy) \cdot w \cdot \mu \quad (4)$$

式中， μ 为电池片的响应率，其实测值为 $340 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ 。根据式 (1) ~ 式 (4)，可以得到：

$$dx = \frac{1}{2}(x_{10} + x_{20}) \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} - \frac{1}{2}(x_{10} - x_{20}) \quad (5)$$

$$dy = \frac{1}{2}(y_{10} + y_{20}) \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} - \frac{1}{2}(y_{10} - y_{20}) \quad (6)$$

可以看出，由于采用了差动式设计构造，本文设计的基于十字式电池片的太阳传感器 (见图 3) 可无需考虑温度补偿等算法。同时，由于具有直

角部分, 遮光罩并没有全部投影在电池片上, 使其加工要求变得更低。

同时, 由于本文设计的太阳传感器在 1° 的小视场下使用, 由太阳入射角造成的辐射强度变化可以不用考虑。设计中, 太阳传感器的高度 h 为 600 mm, 则当太阳方位角为 α 、俯仰角为 β 时,

$$\alpha = \arctan \frac{dx}{h} \simeq \frac{dx}{h} \quad (7)$$

$$\beta = \arctan \frac{dy}{h} \simeq \frac{dy}{h} \quad (8)$$

由此可见, 在本文设计中, 探测器的输出信号与太阳角度之间有着良好的线性相关性。

1.3 电路设计

在电池片输出的信号采集部分, 采用典型的跨阻放大电路加 ADC 采样的方式。在跨阻放大电路中, 由于运算放大器在负反馈拓扑中的“虚短”特性, 需要保证电池片始终工作在线性区内; 同时由于运算放大器具有极高的输入阻抗, 该电路比普通的大采样电阻电路具有更高的精度。选用 OPA2188 运算放大器芯片和 AD7612 模数转换器。这款 SAR 型模数转换器 (16 位) 的分辨率可以达到 16 bit。图 4 为信号采集电路的示意图。

实测数据显示, 在太阳直射下, 电池片单位

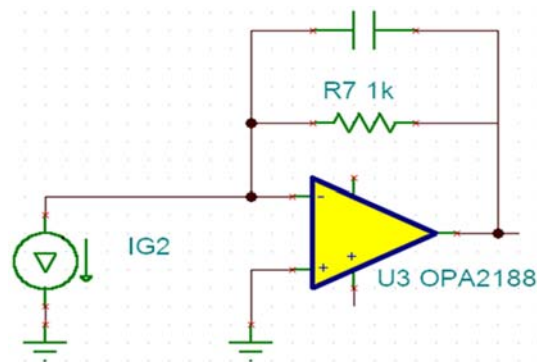


图 4 信号采集电路的示意图

面积所产生的电流 I_0 为 $340 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ 。电池片的尺寸为 $5 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ 。在零位时, 电池片被照到的面积约为 50 mm^2 , 其最大值约为 100 mm^2 。因此, 我们将运算放大器的负反馈电阻设置为 $1 \text{ k}\Omega$ 。

2 实验结果

为了明确传感器的真实性能, 我们首先在实验室太阳模拟器和高精度转台 (定位精度为 $3''$) 的场景中进行了测试。由于实验室太阳模拟器的光照强度约为 0.05 个太阳常数, 本文将运算放大器的反馈电阻调整为 $10 \text{ k}\Omega$, 以使探测器具有足够高的敏感度。

图 5 和图 6 分别为转台俯仰角和方位角与

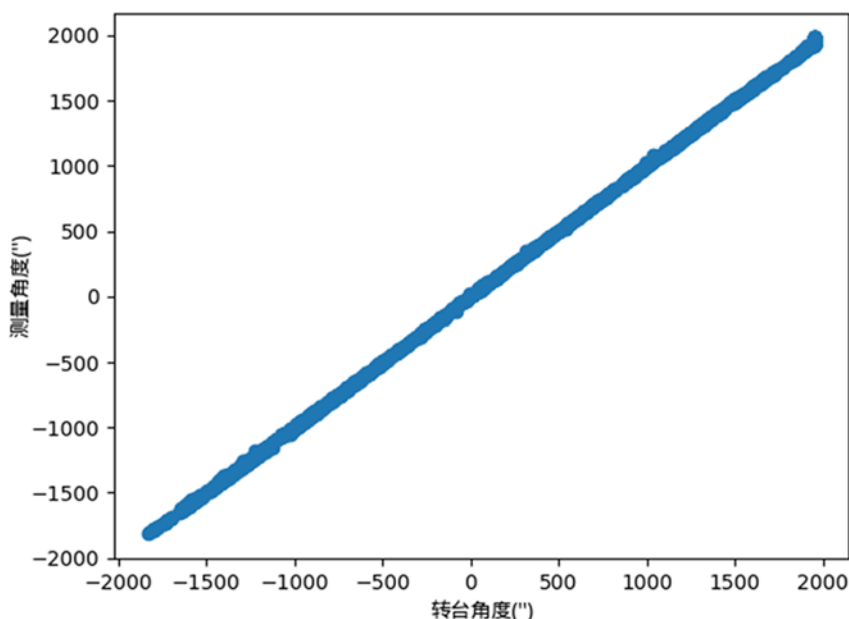


图 5 转台俯仰角与测量角度的关系图

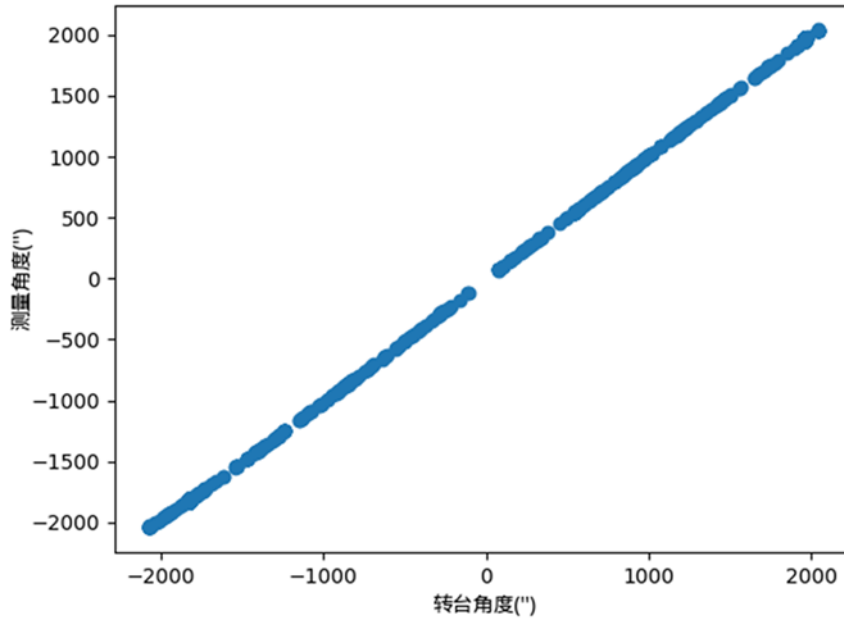


图 6 转台方位角与测量角度的关系图

传感器相应测量值之间的关系图。可以看出, 敏感器的测量值与转台相应数值之间具有良好的线性关系。其中, 俯仰角的测量误差为 $9.97''$, 方位角的测量误差为 $7.06''$; 有效视场角约为 1° ; 刷新频率为 100 Hz 。

2.1 误差分析

由于使用了 4 块分立的硅光电池片, 本文设计的太阳敏感器在电池片的尺寸、安装和敏感度上存在一定的公差。针对电池片响应率的不同, 可以通过实验确定补偿系数。电池片的安装角度误差可被统一换算为硅光电池片的宽度误差。如果组成差分的两块电池片的宽度相差 Δw , 那么

$$\Delta dx = \frac{1}{2}(x_{10} + x_{20}) \cdot \frac{I_1 - I_2 - I_2 \frac{\Delta w}{w}}{I_1 + I_2 + I_2 \frac{\Delta w}{w}} - \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (9)$$

由 $\alpha \simeq \frac{dx}{h}$ 可知, 当 $h=600 \text{ mm}$ 时, 若公差为 $\pm 0.1 \text{ mm}$, 则会造成大约 $1''$ 的误差。同时由于本文所用转台的精度为 $3''$, 也会引入相应的测量误差。

3 结束语

通过设计一种新的十字差动式探测器, 使模拟太阳敏感器在小视场 (1°) 下实现了超高精

度 ($10''$) 的测量, 同时还保留了模拟太阳敏感器刷新率高的特点。在完成更高精度的测试设备的相关试验之后, 若通过补偿现有误差来达到更高的精度, 则必将能在卫星对日观测成像等领域发挥重大作用。

参考文献

- [1] 屠善澄, 鲍百容. 卫星姿态动力学与控制 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [2] 朱鸿泰, 孙胜利, 陈桂林. CMOS APS 在太阳敏感器中的应用研究 [J]. 红外技术, 2004, 26(4): 76-80.
- [3] Joseph B I. Transition Region and Coronal Explorer Mission [C]. Aspen: IEEE Aerospace Applications Conference, 1996.
- [4] James R L, Alan M T, David J A, et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) [J]. Solar Physics, 2012, 275(1-2): 17-40.
- [5] 汪建华, 徐德, 刘云, 等. 基于四象限探测器的掩模板对准检测与控制 [J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 1188-1182.
- [6] 李日忠, 黄俊斌, 秦石乔. 四象限光电探测器象限一致性测量方法 [J]. 传感技术学报, 2006, 19(6): 2610-2612.