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片的探测器,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-xia ¹

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
 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 Semiconductor, 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(1.5×10¹¹ m)。太阳表 面耀斑的直径约为1×107m,则其观测角度约为 13"。太阳的直径为1.4×109m,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 3 太阳敏感器的整体结构

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

$$I_1 = (x_{10} + \mathrm{d}x) \cdot w \cdot \mu \tag{1}$$

$$I_2 = (x_{20} - \mathrm{d}x) \cdot w \cdot \mu \tag{2}$$

$$I_3 = (y_{\scriptscriptstyle 10} + \mathrm{d}y) \cdot w \cdot \mu \tag{3}$$

$$I_4 = (y_{20} - \mathrm{d}y) \cdot w \cdot \mu \tag{4}$$

式中, μ 为电池片的响应率,其实测值为 340 μ A/mm²。根据式(1) ~ 式(4),可以得到:

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

$$dy = \frac{1}{2}(y_{10} + y_{20})\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} - \frac{1}{2}(y_{10} - y_{20})$$
(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敏感器(见图3) 可无需考虑温度补偿等算法。同时,由于具有直

http://journal.sitp.ac.cn/hw

INFRARED (MONTHLY)/VOL.38, NO.7, JUL 2017

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敏感器在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,太阳敏感器的高度 *h*为600 mm,则当太阳方位角为α、俯仰角为 β时,

$$\alpha = \arctan \frac{\mathrm{d}x}{h} \simeq \frac{\mathrm{d}x}{h} \tag{7}$$

$$\beta = \arctan \frac{\mathrm{d}y}{h} \simeq \frac{\mathrm{d}y}{h} \tag{8}$$

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



面积所产生的电流 I_0 为 340 μA/mm²。电池片的 尺寸为 5 mm×23 mm。在零位时,电池片被照到 的面积约为 50 mm²,其最大值约为 100 mm²。 因此,我们将运算放大器的负反馈电阻设置为 1 kΩ。

2 实验结果

为了明确敏感器的真实性能,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 kΩ,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

敏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

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

由 $\alpha \simeq \frac{dx}{h}$ 可知, 当 h=600 mm 时,若公差 为 ±0. 1mm,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.