

文章编号: 1003-501X(2011)09-0001-05

CMOS 星敏感器焦平面装配及标定

钟 兴¹, 金 光¹, 王 栋¹, 邢 飞²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要: 针对高精度 CMOS 星敏感器的使用要求, 本文对焦平面装配的误差进行了理论分析, 搭建了 CMOS 星敏感器装配及标定测试系统, 利用长焦距平行光管像面移动测量方法进行了星敏感器轴上和轴外的星点成像, 获取了焦平面离焦量及倾斜数据。在这些数据指导下, 成功完成了对某焦距 50 mm, 相对孔径 1/1.25, 全视场 20° 的 CMOS 星敏感器的焦平面装配, 轴上点离焦小于 0.01 mm, 倾斜小于 2'。对装配后的星敏感器在高精度气浮转台上进行了主距测试和畸变标定, 标定计算得到主距为 49.77 mm, 精度 0.007 2 mm。利用三阶多项式拟合的方法对系统畸变进行了修正, 修正后的残余畸变对单个星点测量的精度影响可减小到 6.6" 左右, 满足高精度星敏感器的使用要求。

关键词: CMOS 星敏感器; 焦平面; 装配; 标定

中图分类号: V448.222

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.09.001

Focal Plane Assembly and Calibrating of CMOS Star Sensor

ZHONG Xing¹, JIN Guang¹, WANG Dong¹, XING Fei²

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Department of Precision Instrument and Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Focal plane's misalignment is analyzed theoretically to match the requirement of high precision CMOS star sensor. System for assembly and calibrating measurement of CMOS star sensor is established. Defocusing distance and tilt of detector plane are acquired by on-axis and off-axis star sensor imaging test through collimator's image plane moving. Some CMOS star sensor with 50 mm focal length, F/1.25, and 20° field of view is successfully assembled under direction of testing data. Defocusing distance is less than 0.01 mm, and tilt is less than 2'. Principal distance test and distortion calibration are done with measuring system. Principal distance is calculated to be 49.77 mm, and the error is 0.007 2 mm. Distortion of star sensor system is calibrated by third order polynomial fitting data, and the residual error caused by distortion can be reduced to 6.6" when measuring single star.

Key words: CMOS star sensor; focal plane; assembly; calibration

0 引 言

进入二十一世纪以来, 星敏感器的研究和制造向自主导航的概念靠近, 发展趋势表现为视场大, 星表小, 探测星等低。由于视场大, 因此只需要探测较亮的星就可以满足探测星数的要求, 可以保持较高的姿态测量精度。当前广为应用的是 CCD 星敏感器, 但近几年 CMOS 的使用使星敏感器的发展出现新的飞跃。与 CCD 星敏相比, CMOS 星敏主要具有抗辐照性能好、电接口简单和低功耗等优点^[1-2]。

在星敏感器镜头研制完成后, 焦平面期间的精确装配是保障其精度的重要环节。一般的成像光学系统带有调焦机构, 因此焦平面装配相对简单。但星敏感器镜头具有相对孔径大, 焦深小的特点^[3], 并且为了

收稿日期: 2011-03-17; 收到修改稿日期: 2011-05-13

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

作者简介: 钟兴(1982-), 男(汉族), 四川自贡人。博士, 副研究员, 主要研究工作是空间光学系统设计与检测。E-mail: ciomper@163.com。

提高弥散斑质心位置精度测量的稳定性, 以及可靠性和减轻质量等方面的原因, 没有调焦机构, 因此, 装配精度要求较高, 难度较大。如果纯粹依靠机械件的加工精度来保证安装精度的话, 会造成较大的误差; 如果依靠反复修研垫片尝试, 虽然有可能找到最佳的安装位置, 但又会造成周期漫长, 耗费大量人力。

因此, 在原理分析的基础上, 本文搭建了装配及标定测试系统, 在短时间内完成了某焦距 50 mm, 相对孔径 1/1.25, 全视场 20° 的 CMOS 星敏感器的焦平面装配和主距标定。实践证明本文方法具有较强的工程借鉴意义。

1 装配要求分析

焦平面装配的目的本质上是保证探测器感光面的空间位置, 因此, 在直角坐标系下, 其误差包括三个方向的平移和绕三个轴的旋转。对于星敏感器光学系统, 焦平面绕光轴的旋转和在垂直光轴平面内的平移属于系统误差, 经过基准标定后不影响工作性能。因此, 星敏感器焦平面的装配首先应保证其轴向位置, 其次是与光学系统光轴的垂直度。

焦平面装配不佳导致的能量集中度变弱是影响星敏感器工作性能的主要因素。对于本文研究的星敏感器, 正常工作要求 3×3 像素范围内能量集中度在 95% 以上^[4]。利用光学设计数据, 在 ZEMAX 中对误差作用下的能量集中度情况进行了计算, 结果如图 1 所示, 纵坐标均为各视场平均的 3×3 像素范围内的能量集中度。从图 1 可以看出, 当离焦量大于 0.01 mm 时, 能量集中度开始下降; 当离焦达到 0.028 mm, 能量集中度下降至 95%。因此, 结合装配工艺因素, 将离焦误差要求确定为不大于 0.02 mm。

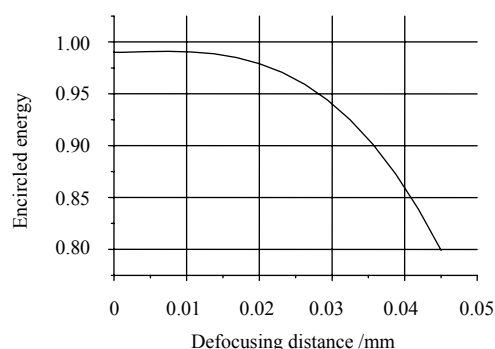


图 1 离焦引起的能量集中度下降

Fig.1 Degeneration caused by defocus

焦平面与光轴的不垂直也可理解为轴外视场的离焦, 因此当边缘视场也保证 0.02 mm 的离焦量时, 倾斜角度 φ_y 应当小于 $\arctan(0.02/L)$, L 为探测器对角线长度的一半。对于本文星敏感器使用的 CMOS 器件, L 为 10.86 mm, 因此 φ_y 应小于 $6.3'$ 。

从上述分析归纳出焦平面的装配要求, 与最佳位置的偏离在轴向上应优于 0.02 mm, 与光轴的倾斜应调整到 $6.3'$ 以内。

2 焦平面装配

2.1 检测系统搭建

光学系统的公差分配以像差为指导, 一般将后截距作为补偿量。在透镜半径公差和厚度公差的共同作用下, 后截距的实际值与设计值将有较大范围的偏离, 这一偏离值大于装配精度要求。因此, 必须对其进行检测以确定焦面位置。搭建 CMOS 星敏感器焦平面装配及标定的测试系统如图 2 所示, 采用亮度可调的白光 LED 作为系统的光源, 可避免光源频闪对成像的影响。平行光管像面位置前后可调。星敏感器安装在高精度转台上, 由计算机负责星敏感器图像信号和转台角度信息的采集。

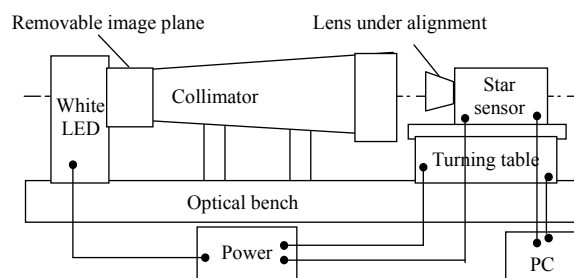


图 2 CMOS 星敏感器焦平面装配及标定测试系统

Fig.2 Focal plane assembly and calibrating measurement system for CMOS star sensor

2.2 焦平面位置测量原理

利用图 2 的系统可对粗装配后的焦平面误差进行检测。当调整平行光管像面前后移动时, 利用采集软件提供的星点图像灰度数值显示功能, 会很容易地寻找到一个最佳位置。记录下此时平行光管像面位置与

原始无穷远焦面位置的差值 σ_1 。由高斯光学原理, 星敏靶面的离焦量 σ_2 可利用下式计算:

$$\sigma_2 = f - \frac{1}{\frac{1}{f} + \frac{1}{f_p} - \frac{1}{f_p + \sigma_1}} \quad (1)$$

式中: f 为星敏焦距, f_p 为平行光管焦距

安装平行光管, 使其光轴与星敏感器本体基准对齐。利用测角法对平行光管的实际焦距进行测量并检校^[5]。在平行光管的无穷远像面安装玻罗板并照明, 将徕卡经纬仪放置在平行光管物镜处, 调光轴水平, 检测玻罗板上长度为 y 的刻线通过平行光管的张角 ω 。利用式(2)计算平行光管焦距, 并将其代入式(1)进行计算。

$$f_p = y / (\tan \omega) \quad (2)$$

当轴上点离焦量确定后, 靶面与理想焦面的偏离可看作绕零视场像点的空间旋转, 在不考虑绕光轴旋转的情况下, 其旋转角度由绕 x 轴旋转角度 φ_y 和绕 y 轴旋转角度 φ_x 合成:

$$\varphi = \varphi_x + \varphi_y \quad (3)$$

以绕 x 轴旋转为例说明焦平面倾斜角度的测量原理, 如图 3 所示。

根据图 3 几何关系, 在存在倾斜的情况下, 通过轴上同样的方法可计算得到焦平面的调节距离 σ_y , 使得轴外入射角度为 ω_y 的光束聚焦。则可得到焦面绕 x 轴旋转的角度:

$$|\varphi_y| = \arctan \frac{\sigma_y}{f' \tan \omega_y} \quad (4)$$

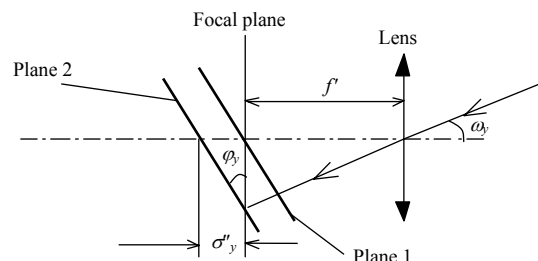


图 3 焦平面倾斜测量原理

Fig.3 Principle of focal plane's tilt measurement

2.3 平行光管焦距选择分析

将式(1)两边微分, 得到离焦量误差:

$$\frac{d\sigma_2}{df} = 1 - \frac{1}{f^2 \left[\frac{1}{f} + \frac{\sigma_1}{f_p(\sigma_1 + f_p)} \right]^2} \quad (5)$$

其中: df 为星敏光学系统的焦距测量误差, 按经验应在 2% 以内, 即 $df=50 \times 0.02=1$ mm。因此, 平行光管像面位置与原始无穷远焦面位置差值 σ_1 一定时, 平行光管焦距越长, 星敏离焦量的测量误差越小。当选择 600 mm 焦距以上的平行光管时, 离焦量的理论测量精度在 2 μ m 以内。

测试中受到各种误差的限制, 理论精度不可能实现。特别是 CMOS 像元尺寸限制了图像采集软件对星点大小变化的空间分辨能力。另外, 暗电流噪声起伏引起的星点像随机变化也会造成判读误差。因此, 必须使平行光管像面移动过程中星点的变化非常显著, 才有利于焦面位置的判断。若采用 200 mm 焦距的平行光管配合 $\Phi 0.1$ mm 星点板, 星敏合焦时高斯像点的直径为 $\Phi 0.025$ mm, 离焦 0.02 mm 时高斯像点的直径为 $\Phi 0.033$ mm, 变化量仅为 32%。而采用 1 m 焦距的平行光管(星点板不变)时, 星敏合焦时高斯像点的直径为 $\Phi 5$ μ m, 离焦 0.02 mm 时高斯像点的直径为 $\Phi 13$ μ m, 变化量可达 160%。因此, 为了便于在图像采集软件中明显地看到星点大小的变化, 平行光管的焦距也应该越长越好。

根据上述两个方面的分析, 本文在实际测试中使用了焦距 1.6 m 的平行光管, 星点直径 $\Phi 0.1$ mm, 取得了较好的效果。

2.4 像差对测量影响的修正

由于 CMOS 星敏感器镜头属于宽谱段的大视场大相对孔径镜头, 虽经光学设计校正, 但轴向色差及场曲不可避免存在一定残余。在球差、慧差和像散都校正良好的情况下, 像面的弯曲为高次非球面形状。本质上反映场曲性质的量为细光束子午场曲 x'_t 和细光束弧矢场曲 x'_s , 它们仅与视场有关^[6]:

$$x'_{t(s)} = A_1 y^2 + A_2 y^4 + A_3 y^6 + \dots \quad (6)$$

因此, 视场越大, 场曲就越明显。如图 4 所示, 在大视场星敏感器中, 由于场曲的存在, CMOS 靶面并不能与像面完全重合。最佳焦面位置是由各谱线和各视场的能量集中度情况综合决定的。

因此, 为了实现焦平面的精确装配, 应由光学设计数据给出中心波长像面与理想平面的偏离情况, 并根据偏离值对测量结果进行修正。

2.5 装配过程

经过前述方法测量并经过修正, 靶面的中心视场离焦量和倾斜量都可以得到相应的数据, 便可以据此进行垫片的修研。但值得注意的是, 由于垫片的精密修研是人工进行, 并且修得过薄之后无法弥补, 因此每次修研都需要留有一定余量, 将修研后的垫片试装并重复上述测量过程, 使离焦量和倾斜量逐步收敛到装配公差内。实践证明, 经过三次修研, 离焦量可控制在 0.01 mm 以内, 倾斜优于 2', 满足总体要求。完成焦平面装配后的星敏感器状态如图 5(a)所示(前端带有附加装调镜, 无遮光罩), 在 CMOS 器件不饱和的状态下采集到的典型星点如图 5(b)所示, 弥散圆能量分布均匀, 3×3 像素内的能量集中非常好。

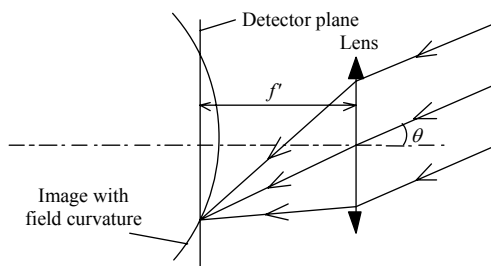


图 4 场曲对焦平面位置测量的影响

Fig.4 Field curvature's infection on focal plane's position measurement

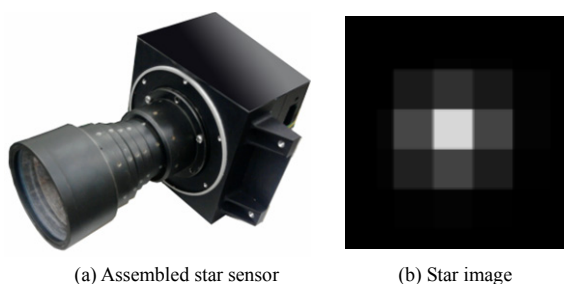


图 5 装配结果

Fig.5 Assembly result

3 主距标定

由于工艺原因, 星敏感器的光学系统装调和焦平面装配不可能完全理想。因此, 为了避免实际使用出现的系统误差, 必须对其进行标定, 获取主距数值, 并获得畸变修正系数^[7-9]。

利用本文测试装置实现星敏感器的标定。测量 n 组入射视场角 ω_i 与对应像高 y_i 的数据, 通过最小二乘一元回归的方法对数据进行解算, 使用式(7)构造正规方程组, 并进行求解, 可得到主距和主点偏移量的最佳估计值。

$$y_i = y_0 + f' \cdot \tan \omega_i \quad (7)$$

主距:

$$f' = \frac{n \cdot \sum (y_i \cdot \tan \omega_i) - \sum \tan \omega_i \sum y_i}{n \cdot \sum \tan^2 \omega_i - (\sum \tan \omega_i)^2} \quad (8)$$

主点偏移量:

$$y_0 = \frac{1}{n} (\sum y_i - f' \cdot \sum \tan \omega_i) \quad (9)$$

对本文星敏坐标系的本体 y 方向进行测量, 计算得到主距为 49.776 4 mm, 精度 0.007 2 mm(1 σ), 该方向上的主点偏移量为 0.042 37 mm。

各视场像面畸变:

$$D_i = y_i - (y_0 + f' \cdot \tan \omega_i) \quad (10)$$

为了消除光学镜头残余畸变对测量数据的影响, 对畸变数据进行三阶多项式拟合, 并将得到的拟合系数代入到数据处理中。拟合多项式表达为

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (11)$$

其中: a, b, c 和 d 为拟合系数, 它们的值和误差如表 1 所示。

测量得到的 D_i 如图 6 中的离散点所示, 拟合后的畸变曲线如虚线所示。测量数据与拟合表达式计算值

之间的最大差值对应的角度值为 $6.6''$ 。表明在单星测量中, 本文星敏感器的相对测量精度可优于 $6.6''$ 。在实际星图识别过程中, 星敏感器将对多个恒星的位置进行同时测量, 可以对误差在一定程度上进行平均。因此, 本文星敏感器角度测量的综合精度可以进一步提高。实际地面观星实验的结果也表明, 该星敏可很好地满足设计指标测量精度优于 $7''(3\sigma)$ 的总体设计指标要求。

表 1 畸变三次多项式拟合系数

Table 1 Third order polynomial fitting coefficients of distortion

Parameter	Value	Error
a	$-2.806\ 48 \times 10^{-4}$	0.001 27
b	$-6.552\ 35 \times 10^{-4}$	0.001 41
c	$-6.037\ 86 \times 10^{-5}$	$4.181\ 27 \times 10^{-4}$
d	$3.753\ 28 \times 10^{-5}$	$3.430\ 68 \times 10^{-5}$

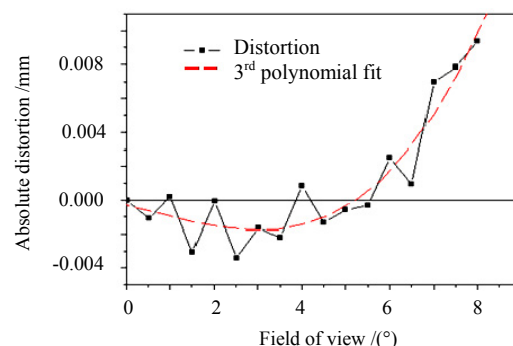


图 6 畸变数据处理

Fig.6 Processed distortion data

4 结 论

本文搭建了专用测试系统, 在理论分析的基础上实现了有数据指导下的大相对孔径大视场 CMOS 星敏感器镜头的装配, 可有效地提高工作效率和装配精度。焦面装配和初步标定结果显示, 其性能符合高精度 CMOS 星敏的使用要求。

致谢: 特别感谢长春光机所装校技术中心谷凤安研究员及李伟民同志在装配过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] Natalie Clark. Intelligent star tracker [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2001, **4592**: 216-226.
- [2] Hancock Bruce R, Stirbl Robert C, Cunningham Thomas J, *et al.* CMOS Active Pixel Sensor Specific Performance Effect on Star Tracker/Imager Position Accuracy [J]. **Proc. of SPIE(S0277-786X)**, 2001, 4284: 43-53.
- [3] 卢欣. CCD 星敏感器光学系统设计 [J]. 中国空间科学技术, 1994(4): 49-68.
LU Xin. Optical design of CCD star sensor [J]. **Chinese Space Science and Technology**, 1994(4): 49-68.
- [4] 董瑛, 邢飞, 尤政. 基于 CMOS APS 的星敏感器光学系统参数确定 [J]. 宇航学报, 2004, **11**(6): 663-668.
DONG Ying, XING Fei, YOU Zheng. Determination of the optical system parameters for a CMOS APS based star sensor[J]. **Journal of Astronautics**, 2004, **11**(6): 663-668.
- [5] 韩昌元. 光学系统检测 [M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009.
HAN Chang-yuan. **Optical System Test** [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [6] 李景镇. 光学手册 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010.
LI Jing-zhen. **Handbook of Optics** [M]. Xi'an: Shan Xi Publishing Company of Science and Technology, 2010.
- [7] 王之卓. 摄影测量原理 [M]. 北京: 测绘出版社, 1979.
WANG Zhi-zhuo. **Photogram Metric Method** [M]. Beijing: Publishing House of Mapping, 1979.
- [8] 刘罡, 高晓东, 曾学东. 大视场光电测量系统实时测量精度的综合评定 [J]. 光电工程, 2001, **28**(6): 10-13.
LIU Gang, GAO Xiao-dong, CAO Xue-dong. A Comprehensive Calibration of the Real-Time Measurement Accuracy for a Photoelectrical Measuring System with Wide Field of View [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2001, **28**(6): 10-13.
- [9] 宋梅, 柴俊栓, 刘金国. 宽覆盖面阵 CCD 测绘相机标定方法 [J]. 光电工程, 2007, **34**(4): 85-88.
SONG Mei, CHAI Jun-shuan, LIU Jin-guo. Calibration of the frame CCD mapping camera with wide overcast [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(4): 85-88.