

文章编号 1004-924X(2009)12-2959-07

三线阵测绘相机热光学试验交会角测试系统

韩 旭^{1,2}, 马 军¹, 居 波¹, 吴清文¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:对三线阵测绘相机热光学试验交会角测试机理进行了研究,设计了试验测试系统,提出了一种空间交会角定量测量方法。针对测绘相机热光学试验阐述了对热真空试验设备和光学测量场等测试系统的要求,特别是平行光管的改造和特种分划板的要求。同时,描述了进行三线阵测绘相机热光学试验前的准备工作。利用 LabVIEW 软件编制数据采集系统,采用定量测量法对三线阵测绘相机交会角进行了测量。结果显示,测试相机在工况转变后交会角的变化在 1" 以内,表明该测量方法可以准确得到相机交会角的变化量,测量数据对三线阵立体测绘相机在轨测量及地面影像分析提供了可靠的依据。

关键词:测绘相机;空间交会角;热环境试验;灰度值

中图分类号:V447.3;V416.4 **文献标识码:**A

Measuring system of space intersection angle for three-line mapping camera in thermal-optical test

HAN Xu^{1,2}, MA Jun¹, JU Bo¹, WU Qing-wen¹

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

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A quantitative measurement method for the space intersection angle of a three-line mapping camera is put forward in a thermal-optical environment test after studying the measuring principle of the intersection angles and designing a new measuring system. The requirements of the thermovacuum measuring system and optical measurement fields are presented in detail, especially the demands for the collimator and special reticle are described. Then, the preparation for the thermal-optical test is issued. A measurement software system is established based on LabVIEW and the intersection angle of the three-line mapping camera is tested by the quantitative measuring method. The results show that the change of the intersection angle is less than 1" when the temperature operating condition has been changed. It is concluded that the quantitative measurement method can get the accurate change of the intersection angle, and measurement data can provide important references for the ground analysis

收稿日期:2009-09-08;修订日期:2009-09-18.

基金项目:国家重大工程资助项目

with three-line mapping cameras.

Key words: mapping camera; space intersection angle; thermal environmental test

1 引言

CCD 传输型相机是 80 年代发展起来的用于航天摄影测量和遥感的重要传感器。与常规的航天立体测绘相机的构像原理不同,其拥有直接在轨成像的能力。三线阵 CCD 立体测绘相机由具有一定交会角的前视、正视和后视线阵 CCD 阵列构成的光学系统组成。当航天飞行器飞行时,每个 CCD 阵列以一个同步的周期连续扫描地面并产生相互重叠的 3 张图像^[1]。这 3 张影像是同一场景在相近时相、不同角度获取的,因此可以提供同一场景不完全相同的信息。通过对 3 个相机获得的影像数据处理就可以得到被测位置的三维立体图像^[2-8]。

由于航天器从运载、入轨、运行以至返回地面期间会受到多种空间环境效应的影响,而对相机结构尺寸稳定性影响最大的因素就是空间环境温度的波动。相机对周围环境温度的变化非常敏感,由热引起的光学和机械误差将导致相机的视轴漂移和光学系统的波前畸变,从而造成影像模糊,严重破坏成像质量。因此,要求相机结构及光学元件在空间环境条件下必须具有足够的尺寸稳定性,而对空间相机进行空间环境下热光学试验方法的模拟,对光学系统进行热致光学性能变化分析,为在轨调焦和使用提供依据很有必要。该项工作是空间相机研制过程中的关键技术,也是空间相机空间环境试验技术的重要内容^[9]。

三线阵立体测绘相机测量图像是由三台独立相机合成的,因此交会角的稳定性将决定立体成像质量的好坏。为了保证在轨空间交会角的稳定性,几何参数实验室标定^[10-11]和热光学试验相机光学传递函数和交会角的测量必须在上天前由地面试验来完成。目前,测绘相机空间交会角的测量还处于研究阶段,本文对交会角测量方法进行了研究并提出了定量测量方法,采用该方法对测

绘相机空间交会角进行了测量,得到了不同工况下相机交会角的变化量,为地面合成图像提供了技术支持。

2 交会角测试方法

三线阵测绘相机在轨安装示意图如图 1 所示,正视和前视以及正视与后视的空间交会角为 $25^\circ \pm 5''$,热光学交会角试验目的就是要在地面试验中验证相机在模拟在轨状态下,温度改变时交会角的变化量能否满足设计要求。在实际测量时,只对测绘相机的正视和前视进行了试验验证,采用定量测量方法进行测量。

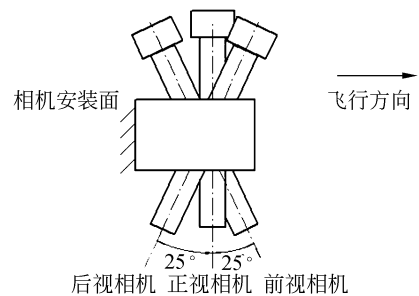


图 1 三线阵测绘相机在轨安装示意图

Fig. 1 Installation scheme of three-line mapping camera on orbit

图 2 为经纬仪监测平行光管方位角变化示意图,具体的测量原理方法如下:

- (1) 利用两个平行光管,分别对准三线阵测绘相机的前视和正视相机;
- (2) 在平行光管焦点处,安放 $\Phi 0.1 \text{ mm}$ 的星点孔,并用均匀光照明。此时根据焦距比和像元的大小,星点孔成像在测绘相机的焦面上能够压到 5~6 个像元;
- (3) 分别调节前视、正视相机对应的两个平行光管的方位角,使平行光管星点孔的像扫过相机的线阵 CCD 探测器,通过观察 CCD 灰度值的变化,找到最大值(此时为光斑型心);
- (4) 平行光管固定后,利用平行光管后方的

经纬仪,分别瞄准光管上的立方棱镜,并且自准,记下当前每个相机的角度值 $\theta_{\text{forward}}, \theta_{\text{straight}}$ 。二者相减, $\Delta_1 = \theta_{\text{forward}} - \theta_{\text{straight}}$, 得到工况 1 时的前视和正视相机夹角;

(5) 转工况,热平衡后,重复上述步骤,得到转工况后的角度值 $\theta'_{\text{forward}}, \theta'_{\text{straight}}$, 二者相减, $\Delta_2 = \theta'_{\text{forward}} - \theta'_{\text{straight}}$, 得到工况 2 的前视和正视相机夹角;

(6) $\Delta_2 - \Delta_1$ 为转工况后的空间交会夹角变化量。

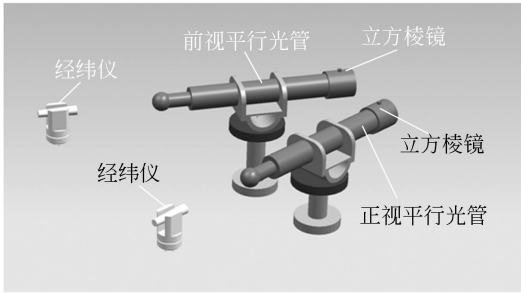


图 2 经纬仪监测平行光管方位角变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram for azimuth of collimator supervised by theodolite

3 测试系统

3.1 热真空试验设备

试验选用的热真空试验设备是经过改造的 RZ-2500 真空罐。为了模拟通光路径需要在尾端重新制作一个直径为 1 m 的法兰,并在法兰上镶上两个 $\Phi 400$ nm 窗口,两窗口的光轴互成 25° 。如图 3 所示,表 1 为热真空试验设备基本参数。

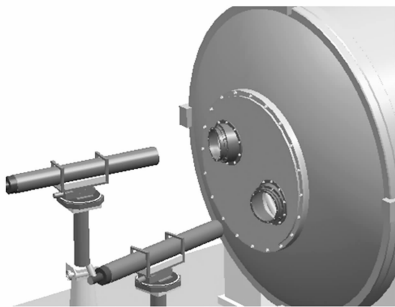


图 3 窗口及法兰安装示意图

Fig. 3 Installation framework of window and flange

表 1 热真空试验设备参数

Tab. 1 Parameters for space environmental simulator

热真空试验设备	
真空罐外形尺寸	$\Phi 3.6 \text{ m} \times 6.0 \text{ m}$
有效试验空间(热沉内尺寸)	$\Phi 2.5 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$
罐中心高	2.00 m
最大温度范围	$-50 \text{ }^\circ\text{C} \sim +100 \text{ }^\circ\text{C}$
温度梯度	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$
试验真空度	$\leq 1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
升降温速率	$2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$

3.2 光学测量场

光学测量场是配合热真空设备模拟测绘相机在轨道运行中经历的主要空间环境的检测设备,它主要检测测绘相机在空间环境的热光学试验过程中,测绘相机的前视、正视、后视光学系统的传函、焦面位置、平行度和交会角的变化。本文的光学测量场主要是为了测量测绘相机空间交会角的变化,它由 1.6 m 平行光管及特种分划板、可见光源、高精度三维转台、光管固定基座等组成。光学测量场如图 4 所示。

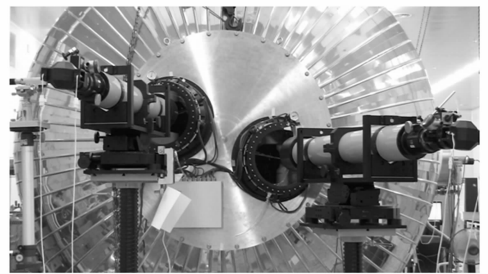


图 4 光学测量场

Fig. 4 Optical measurement field

3.2.1 平行光管和三维转台

1.6 m 平行光管作为测绘相机的远距离目标源,提供星点孔目标,测量测绘相机夹角的变化,平行光管通过高精度三维转台能够进行方位、俯仰、旋转微调。其口径为 150 mm,焦距为 1 600 mm。

在两个平行光管上分别固定立方棱镜,代表光管的中间坐标系。在整个测试过程中遵循“右手坐标系”原则。平行光管光学结构如图 5 所示。

高精度三维转台与平行光管连接,使光管能

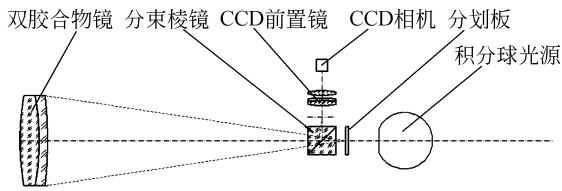


图 5 平行光管光学结构

Fig. 5 Optical structure of collimator

够进行方位、俯仰、旋转微调,以保证光管焦平面上的特种分划板上的像准确地投在测绘相机线阵 CCD 接收器上。平行光管和高精度三维转台外型结构如图 6 所示。

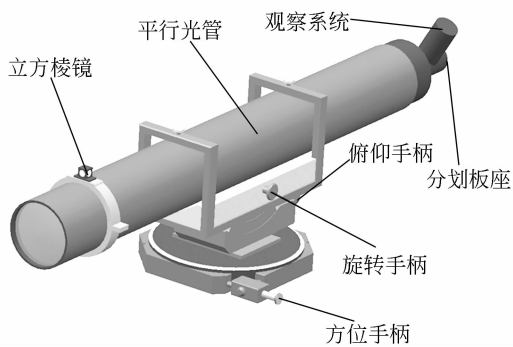


图 6 三维转台外形轮廓

Fig. 6 Outer structure of three-dimension turntable

3.2.2 特种分划板—星点孔

本次试验成像所采用的分划板是 0.1 mm 直径星点孔。根据夫琅和费圆孔衍射原理,光强分布公式为 $I(P) = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2}$, 式中 I_0 为光轴上的光强, u 为衍射因子。可以知道星点孔成像在 CCD 上近似于高斯分布,即中间像元能量最高, CCD 灰度值最大,其两边的像元能量次之,灰度值也次之,依次类推。

4 测试准备工作

4.1 测绘相机入罐状态

相机入罐后,其安放状态与使用状态成 90° , 如图 7 放置方式(本次试验只测试正视和前视相机),此时,线阵 CCD 的方向垂直于水平面。

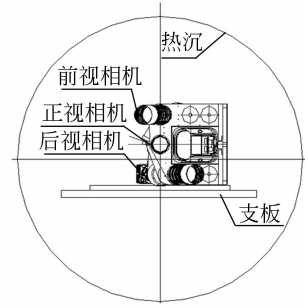


图 7 三线阵测绘相机测试安装示意图

Fig. 7 Installation framework of three-line mapping camera during test

4.2 平行光管稳定性的测试

平行光管作为检测设备,必须保证自身的稳定性,否则,所测量的数据不可靠。因此,在进行测量之前,要对平行光管进行稳定性的测试。测量方法是将平行光管调整好,利用 4 台经纬仪进行交汇测量,在 24 h 之内,测得结果如表 2 所示。从表中可以看到 Z 正视与 Z 前视(空间交会角方向)为 $0.468''$,完全满足两平行光管在测试现场环境下稳定性的要求,平行光管坐标示意图如图 8 所示。

表 2 平行光管监测数据

Tab. 2 Measurement data for collimator ($^\circ$)

	X 正视	Y 正视	Z 正视
X 前视	-2.2×10^{-5}	4.8×10^{-5}	0.000 29
Y 前视	8.5×10^{-5}	-0.000 1	-0.000 13
Z 前视	-0.000 3	9.1×10^{-5}	-0.000 13

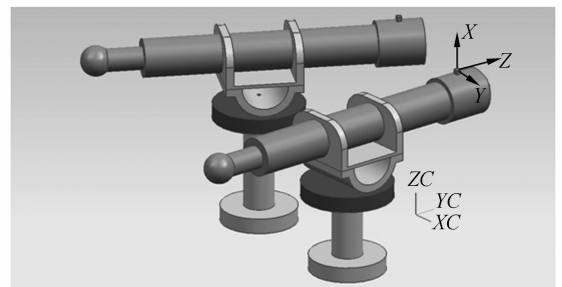


图 8 平行光管坐标示意图

Fig. 8 Coordination framework of collimator

5 测试

5.1 测试软件

根据测试要求,利用 LabVIEW 软件编制测

试相机交会角的数据采集系统。通过输入相应的工况信息和测量数据,测试软件可以计算、显示和输出交会角数据拟合曲线和单个相机的交会角的变化量。图 9 示出两种曲线,一种曲线为经纬仪测量角度与测量点灰度值最大值的拟合曲线,另一种曲线为角度与测量点灰度值之和的拟合曲线。由于灰度值之和的曲线考虑了一个测量点的所有像元的能量变化,因而更能反映真实的情况。在右边的曲线(灰度值之和)中,通过计算找到曲线最大值对应的角度,此角度为单个相机工况变化后的角度值。

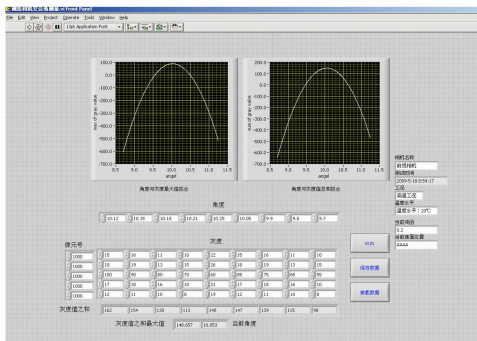


图 9 测试软件示意图

Fig. 9 Framework of test software

5.2 测试结果

测试分为两个工况来进行,即工况 1 和工况 2 两种。表 3 所列数据为空间交会角的测量数据,从测量数据看,在由工况 1 向工况 2 转换后,测绘相机的交会角的变化 $\Delta = \Delta_2 - \Delta_1 = -0.87''$,在 $1''$ 的范围内变化,满足设计指标。

表 3 交会角测量数据

Tab. 3 Measurement data

工况	正视初始角度	前视初始角度	正视与前视之间变化角度
1	122°36'38.80"	42°29'1.20"	-80°7'37.60"
2	122°36'40.55"	42°29'2.10"	-80°7'38.47"

参考文献:

[1] 胡莘. 三线阵 CCD 相机设计中的摄影测量问题[J]. 测绘科学技术学报, 1999,19(1):41-45.
HU X. Photogrammetric issues in design of three-

5.3 误差分析

在测量过程中,影响测量误差的因素有以下几种:

(1)平行光管的稳定性

由表 2 可以看出,两平行光管在 Z 轴方向(光轴方向)为 0.00013° ,即 $0.468''$ 。

(2)监视平行光管的徕卡经纬仪的稳定性

两台经纬仪在互瞄及分别瞄准前视、正视平行光管的立方棱镜过程中,经纬仪的电子水泡最大跳动一格(一格为 $1''$)。同时在整个测量过程中,经纬仪的电子水泡也是最大跳动一格(一格为 $1''$)。综合上述,经纬仪的稳定性为 $1''$ 。

(3)经纬仪的瞄准误差

经纬仪在自准测量过程中,由同一人瞄准,并且进行多次测量,其误差应小于 $2''$ 。

(4)徕卡经纬仪精度为 $0.5''$

利用定量测量方法,其总的测量标准不确定度 $\sigma = \sqrt{0.468^2 + 1^2 + 2^2 + 0.5^2} = 2.34''$,测绘相机角度变化量为 $5''$,利用这种方法测量,可以满足精度要求。

6 结论

测绘相机空间交会角的稳定性影响地面影像准确性,交会角地面在轨模拟试验可以为在轨分析和地面合成提供坚实的数据基础。本文对三线阵立体测绘相机热光学试验空间交会角的测量方法进行了研究,详细阐述了试验设备和试验前准备状态,并提出了测量方法即定量测量方法。使用定量测量方法,利用 LabVIEW 软件编制的测量系统,本次试验得到的正视相机和前视相机空间交会角的变化在 $1''$ 内。

line array camera[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 1999,19(1):41-45. (in Chinese)
[2] 胡莘,曹喜滨. 三线阵测绘卫星的偏流角改正问题[J]. 测绘科学技术学报,2006,23(5):321-324.

- HU X, CAO X B. The correction of drift angle of the three-line array mapping satellite [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(5):321-324. (in Chinese)
- [3] 胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5):695-699.
- HU X, CAO X B. Analysis on precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(5):695-699. (in Chinese)
- [4] 胡燕, 胡莘, 王新义, 等. 偏流角对星载三线阵相机摄影的影响[J]. 测绘科学, 2006, 31(4):62-63.
- HU Y, HU X, WANG X Y, *et al.*. The influence of drift angle on satellite photography of three-line array camera[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(4):62-63. (in Chinese)
- [5] 王任亨, 王新义, 李晶, 等. 提高卫星三线阵 CCD 影像空中三角测量精度及摄影测量覆盖效能[J]. 测绘科学, 2003, 28(3):4-8.
- WANG R H, WANG X Y, LI J, *et al.*. To improve the accuracy of aerial triangulation of satellite born three-line array CCD imagery and its photogrammetric cover efficiency [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2003, 28(3):4-8. (in Chinese)
- [6] 贺东雷, 曹喜滨. 三线阵 CCD 立体测绘卫星像移姿态跟踪补偿研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(10):1744-1747.
- HE D L, CAO X B. Image motion compensation of three-line CCD camera stereo mapping satellite by attitude tracking [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(10):1744-1747. (in Chinese)
- [7] 杨居奎. 偏流对三线阵 TDICCD 测绘相机的影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(4):27-32.
- YANG J K. The effect of the drift on three-line TDICCD mapping camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4):27-32. (in Chinese)
- [8] 陶家生, 王世涛. 大型航天三线阵立体测绘相机精度敏感因素的分析[J]. 光学技术, 2006, 32(1):89-91.
- TAO J S, WANG SH T. Analysis on the large-scale space three-linear array camera precision sensitive factors [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(1):89-91. (in Chinese)
- [9] 蒋山平, 杨林华. 空间太阳望远镜热光学环境试验技术[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(2):173-176.
- JIANG SH P, YANG L H. Review on thermal-optical test for space solar telescopes [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(2):173-176. (in Chinese)
- [10] 吴国栋, 宋丹. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1727-1730.
- WU G D, SONG D. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1727-1730. (in Chinese)
- [11] 吴国栋, 韩冰, 何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10):1628-1632.
- WU G D, SONG B, HE X. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1628-1632. (in Chinese)

作者简介:



韩旭(1974—),男,吉林长春人,博士研究生,工程师,1997年于长春工业大学获得学士学位,2000年于吉林大学获得硕士学位,主要从事空间遥控热辐射光学及电子设备振动和噪声故障诊断的研究。E-mail: frequency126@126.com

通讯作者:



马军(1960—),男,吉林长春人,研究员,1983年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学检测及检测设备的研制。E-mail:mj-4856@163.com



居 波(1966—),男,吉林长春人,副研究员,1988 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光学检测技术的研究和检测仪器的研制。E-mail:jubo@ciomp.ac.cn

导师简介:



吴清文(1968—),男,四川简阳人,博士生导师,研究员,1991 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994 年,1997 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获硕士、博士学位,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 研究和空间光学遥感器热控技术的研究。E-mail:wuqw@ciomp.ac.cn

●下期预告

双折射滤光器的误差分析与性能优化

玄伟佳^{1,2},王东光¹,邓元勇¹,苏江涛¹,张志勇¹,孙英姿¹

(1. 中国科学院 国家天文台 怀柔太阳观测站,北京 100012;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

对于双折射滤光器型太阳磁场望远镜,滤光器的研制质量直接影响透过带,进而影响太阳磁场的测量。当光线倾斜入射或者偏振元件存在误差时,双折射滤光器的透过带将发生漂移,形状将发生变化。分析误差项对滤光器性能的影响,有效减小误差,可以提高研制质量。通过计算机编程,完全模拟光线轨迹,精确分析了多种误差项对双折射滤光器透过带的影响。给出了引起透过带漂移、展宽、极大值和极小值变化的主要误差项,其中入射角、晶体光轴倾角误差、晶体厚度误差和 1/4 波片光轴方位角误差影响透过带漂移;只有晶体光轴方位角误差影响透过带宽,当误差为 2° 时,透过带展宽了 0.078%;宽视场 1/2 波片光轴方位角误差对极大值的影响最明显,当误差为 2° 时,极大值减小了 0.487%;晶体光轴方位角误差、宽视场 1/2 波片延迟误差和 1/4 波片光轴方位角误差对极小值都有不同程度的影响。