

## 航天大视场遥感相机畸变测试方法

李重阳,董欣,岳丽清,马丽娜,张继友

(北京空间机电研究所 先进光学遥感技术北京市重点实验室,北京 100094)

**摘要:** 航天遥感相机的畸变作为相机的重要参数,其测试精度直接关系到相机获取图像后的图像处理精度。对于航天非测绘遥感相机,在设计之初往往对其光学系统的畸变设计要求没有测绘相机高,其光学系统的畸变一般会比较大会比较大,需要对此类遥感相机,特别是视场较大的遥感相机的畸变进行精确测试,为其在轨飞行检校提供比较精确的初始条件。文中在经典的精密测角方法的基础上,建立了针对大畸变航天遥感相机的数学模型,针对视场较大、弧形畸变较大的测试难点提出了合理可行的测试思路,完成了被测相机的高精度畸变测试,取得了理想的效果。实际测试结果表明:畸变测试精度优于  $1.8\mu\text{m}(1\sigma)$ ,可以满足被测相机的高精度畸变测试需求,对航天非测绘大视场遥感相机畸变测试有参考借鉴意义。

**关键词:** 非测绘; 大视场; 遥感相机; 畸变

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1117003

## Testing method of distortion for space remote sensing camera with large field of view

Li Chongyang, Dong Xin, Yue Liqing, Ma Lina, Zhang Jiyou

(Key Laboratory for Advanced Optical Remote Sensing Technology of Beijing, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The distortion of the space remote sensing camera was an important parameter, the test accuracy of which was directly related to the image processing precision after getting the image. For the space non-mapping remote sensing camera, the requirement for the distortion of the optical system was not as high as mapping remote sensing camera at the beginning of the design. So its distortion of the optical system was large in general. For this kind of remote sensing camera, especially those with large FOV, it's necessary to test distortion of the camera accurately. This can provide more accurate initial condition for the calibration in-orbit. Based on the precision of angle measuring method, the mathematical model of space remote sensing camera in view of the large distortion was established in this paper, and a reasonable and feasible test idea was proposed for the large FOV and arc distortion of the camera. The high accuracy test to the distortion of the under test camera was completed, and the results were ideal. The practical test results show that the accurate of distortion is better than  $1.8\mu\text{m}(1\sigma)$ . The test accuracy can meet the high requirements of test precision for under test camera. So this method has reference significance to the distortion test of the space non-mapping remote sensing camera.

**Key words:** non-mapping; large field of view; remote sensing camera; distortion

收稿日期:2018-06-05; 修订日期:2018-07-03

基金项目:国家重大科技专项工程

作者简介:李重阳(1987-),男,工程师,硕士,主要从事光学遥感器装调与测试等方面的研究。Email:jilulcy508@sina.com

## 0 引言

随着“高分重大专项”的顺利实施,多颗高分辨率航天遥感卫星相继成功发射,国内高分辨率对地观测能力有了显著提升。但除了资源三号 01 星和 02 星搭载的三线阵相机以及天绘一号搭载的遥感相机具备立体测绘能力<sup>[1-3]</sup>,其余在轨运行的均为非测绘类遥感相机,其光学系统的设计畸变相对较大,甚至可达毫米量级,需要在研制阶段以及在轨运行阶段对其畸变进行精确测试。国外的研究机构如德国柏林空间中心、瑞士 LH 实验室以及国内的多家科研院所如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、北京空间机电研究所等对测绘类遥感相机的内方位元素与畸变实验室测试技术均进行了深入的研究<sup>[4-8]</sup>。目前,对于光电成像型遥感相机的畸变测试方法一般分为两大类:一类是基于自标定理论的测试方法<sup>[9-10]</sup>;另一类是基于精密测角理论的测试方法。前者适用于短焦(焦距一般为几十毫米)面阵相机,后者适用于长焦线阵相机以及面阵相机。一般情况下,高分辨率的航天对地遥感相机焦距较长,更适用基于精密测角理论的测试方法。所以国内外各研究机构进行畸变测试的基本原理均基于经典的精密测角法,且目前国际主流测量技术水平可满足 1:10 000 比例尺航天测绘相机的研制需求。相对于测绘类遥感相机在摄影测量领域的重要应用价值,非测绘类遥感相机在资源普查、环境调查以及军事侦察等领域用途广泛<sup>[11]</sup>。对于这类非测绘遥感相机,需要对其畸变的高精度测试进行专门研究,但相关研究进展及成果暂未见报道。文中针对航天大视场非测绘遥感相机视场大、相对畸变大的特点,提出一种畸变测试方法,可为航天大视场非测绘遥感相机研制与测试人员提供参考。

## 1 测试基本原理

对于长焦距航天遥感相机的畸变,国内外通常采用精密测角法进行测试,其测试原理如图 1 所示。

$N'$  为被测相机镜头的后节点, $O$  为像面中心, $P$  为像面测量主点位置,角度  $\Delta W$  是测量主点和像面中心偏差所成的角度, $f$  为被测相机主距, $H_i$  为测量点, $H'_i$  为被测点的理想位置, $L_i$  为  $H_i$  距像面中心  $O$  点的距

离, $W_i$  为对应  $H_i$  点的偏角, $p$  为主点与中心的偏移量。

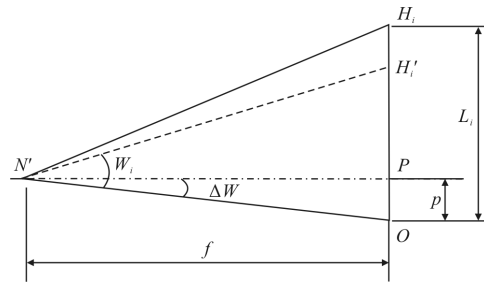


图 1 畸变一维测试原理

Fig.1 Test principle of distortion for one dimension

根据图中的几何关系, $H_i$  点的畸变计算公式为:

$$D_i = L_i - f \tan W_i + p \tan^2 W_i \quad (1)$$

为了求解该方程,一般令畸变的平方和最小,从而得到该超定方程的解<sup>[12]</sup>,求出主点和主距:

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^N L_i \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^3 W_i) - (\sum_{i=1}^N L_i \tan W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i)}{(\sum_{i=1}^N \tan^3 W_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i)} \quad (2)$$

$$p = \frac{(\sum_{i=1}^N L_i \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^2 W_i) - (\sum_{i=1}^N L_i \tan W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^3 W_i)}{(\sum_{i=1}^N \tan^3 W_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \cdot \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i)}$$

相机的主点与像面中心位置的差别一般在像元级,可以忽略不计,即  $p=0$ ,可以得到:

$$f = \sum_{i=1}^N L_i \cdot \tan W_i / \sum_{i=1}^N \tan^2 W_i \quad (3)$$

假设被测相机的主距值  $f$  已知,可以得到:

$$p = (\sum_{i=1}^N f \cdot \tan^3 W_i - \sum_{i=1}^N L_i \cdot \tan^2 W_i) / \sum_{i=1}^N \tan^4 W_i \quad (4)$$

将采集到的每个采样点的质心位移  $L_i$  以及对应的角量  $W_i$ ,代入到公式(2)中得到主点  $p$  和主距  $f$ ,再将主点  $p$  和主距  $f$  代入到公式(1)中求解每个采样点的畸变  $D_i$ 。

## 2 测试方法

### 2.1 被测相机的特点

文中讨论的被测相机采用离轴四反式光学系统,如图 2 所示。沿线阵方向( $X$  方向)的视场角为  $36^\circ$ ,采用四色线阵 CCD 器件。相机沿线阵方向( $X$  方向)的畸变较大,且垂直线阵方向( $Y$  方向)存在弧形

畸变,光学设计的畸变图如图 3 所示。

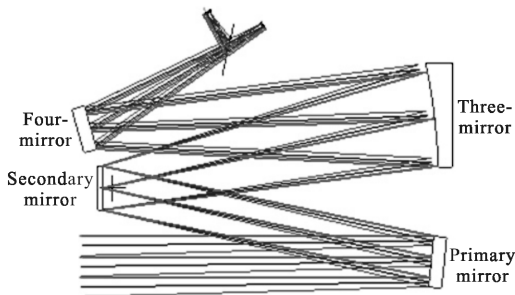


图 2 被测相机光学系统

Fig.2 Optical system of the camera under test

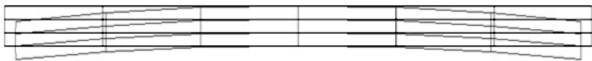


图 3 被测相机的光学系统畸变网格诊断图

Fig.3 Distorted grid diagnosis of the camera's optical system under test

该相机采用的线阵 CCD 四个谱段在  $Y$  方向的光敏区宽度约为  $2\text{ mm}$ , 将该相机光学系统 CODE-V 模型代入 CODE-V 软件中计算发现, 边缘视场在  $Y$  方向的畸变约为  $1.9\text{ mm}$ 。这就意味着边缘视场的像点位置与中心视场相比, 其视场在  $Y$  方向偏离了约  $0.5^\circ$ , 这就为该相机的畸变测试带来了很大的困难。经典的精密测角法进行畸变测试需要平行光管提供点目标或者线目标, 而大多数长焦距、大口径平行光管的有效视场一般在  $15'$  左右, 尤其是离轴反射式平行光管<sup>[13]</sup>。如果用来对该相机进行光学畸变测试, 需要多次在相机视场的  $Y$  方向平移平行光管或者被测相机, 这很容易引入非常大的误差。即便有大视场的平行光管可以使用也需要考虑平行光管自身的畸变<sup>[14]</sup>, 这是由于当采集被测相机边缘视场靶标像时, 参与成像的靶标区域已经不是平行光管中心视场了, 若平行光管有较大的畸变, 会对测试结果带来额外误差。

### 2.1 测试系统的组成

为了摆脱研制定位精度需要达到亚像元级的平移设备的依赖, 测试人员采用大视场、近似无畸变镜头来实现待测相机的高精度畸变测试。项目组在某预研项目中完成了某型镜头的装调工作, 该镜头采用透射式准远心系统, 与待测相机焦距之比大于 7, 有效通光口径之比大于 4, 视场角大于  $5^\circ$ , 焦距、口

径和视场角均可满足待测相机的需求, 且绝对畸变小于  $2\ \mu\text{m}$ , 相比于待测相机毫米量级的畸变可忽略不计。根据该思路, 搭建如图 4 所示的测试系统。

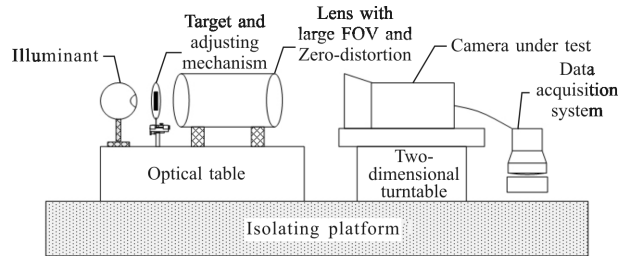


图 4 测试系统示意图

Fig.4 Test system schematic

### 2.2 测试过程

大视场近似无畸变镜头的焦面位置安装定制矩形靶标, 靶标的线视场应不小于  $20\text{ mm}$ , 保证可覆盖被测相机垂直线阵方向在边缘视场的畸变偏离量。靶标安装在多维调整机构上, 用五棱镜法确定靶标的理想位置。被测相机安装在二维转台上, 安装相机时保证相机光学系统的入瞳位于转轴中心处, 确保在测试过程中平行光管的出射光始终能覆盖被测相机的入瞳。

利用被测相机光轴基准镜, 通过调整相机位置使相机视轴与大视场无畸变镜头的视轴同轴。调整二维转台俯仰角, 使矩形靶标的中心成像在 CCD 上的 B1 谱段。转动转台方位角, 每隔一定角度使靶标依次在 CCD 的 B1 谱段成像, 采集到的图像通过亚像元质心计算软件计算得到靶标像的质心位置, 记录每个成像点的转台角度  $W_i$ , 其中  $i=1, 2, 3, \dots$ 。完成 B1 谱段的数据采集后调节二维转台的俯仰角, 依次完成所有谱段的数据采集。

### 2.3 数学模型及数据处理

对于测绘相机, 其最大相对畸变一般要求在  $0.03\%$  以下, 实际设计值往往更小, 其量级一般在微米级<sup>[15]</sup>。所以, 在解算其畸变的时候一般选择全视场畸变平方和最小为求解条件, 在此条件下, 会解算出一个经过最佳规划的主距。但对于全视场最大畸变在毫米量级的非测绘相机, 若将规划后的主距代入数学模型进行计算, 得到的相机畸变会比真实畸变小, 直接使用得到的畸变数据对在轨所获图像进行校正会有一定的误差<sup>[16]</sup>。为此, 对于畸变较大的相

机,文中提出采用近轴主距结合畸变测试数学模型来获取被测相机各视场的畸变是比较合理的。

对于每个测试点  $M_i$ ,均对应一个角度值  $W_i$  和质心位移  $L_i$ 。由于光学系统存在很大的畸变,每个测试点  $M_i$  的主距  $f_i$  与光学系统理想的主距是不同的。每一个测试点的主距均可表示为:

$$f(L_i)=L_i/\tan(W_i) \quad (5)$$

将每个像元所对应的主距用关于像元质心位移  $L_i$  的高次多项式表示如下:

$$f(L_i)=a(n)(L_i)^n+a(n-1)(L_i)^{n-1}+a(n-2)(L_i)^{n-2}+\dots+a(1)(L_i)+a(0) \quad (6)$$

利用高次多项式对取得的数据进行拟合,一般情况,如果在测试中环境控制得当,测试设备以及靶标像质心细分算法的精度较高,当  $n$  取 4 时,拟合多项式的  $R^2$  值可达 0.99 以上。令质心位移  $L_i=0$ ,得到该相机的近轴主距  $f_0$ ,将主点  $p$  和近轴主距  $f_0$  代入到公式(1)中求解每个采样点的畸变  $D_i$ 。

### 2.4 测试误差分析

畸变的测量误差  $\delta_D$  包括三个来源,即靶标像质心位移测量误差  $\delta_L$ ,角度测量误差  $\delta_w$ ,主距测量误差  $\delta_f$ ,畸变测量误差的表达式为:

$$\delta_D=\sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial L}\right)^2 \cdot \delta_L^2+\left(\frac{\partial D}{\partial W}\right)^2 \cdot \delta_w^2+\left(\frac{\partial D}{\partial f}\right)^2 \cdot \delta_f^2+\left(\frac{\partial D}{\partial p}\right)^2 \cdot \delta_p^2} \quad (7)$$

式中:  $\delta_f = \sqrt{\left(\frac{1}{\sum \tan^2 W_i}\right)^2 \cdot \delta_L^2 + \frac{\sum L_i^2 \sec^4 W_i}{(\sum \tan^2 W_i)^2} \cdot \delta_w^2}$  ;  
 $\left(\frac{\partial D}{\partial W}\right)^2 = (-f \cdot \sec^2 W_i - 2p \cdot \tan W_i \cdot \sec^2 W_i)^2 \approx f^2 \cdot \sec^4 W_i$  ;  
 $\left(\frac{\partial D}{\partial P}\right)^2 = \tan^4 W_i$  ;  $\left(\frac{\partial D}{\partial L}\right)^2 = 1$  ;  $\left(\frac{\partial D}{\partial f}\right)^2 = \tan^2 W_i$ 。

测试使用的二维转台经过精确标定,其精度较高,30°内的视值误差 PV 值为 0.5",被测相机所用 CCD 像元尺寸为 13 μm,靶标像质心位移测量精度优于 0.1 个像元。取  $\delta_w=0.5$ , $\delta_L=0.1 \cdot \text{pix}$ ,其中 pix 为 CCD 的像元宽度,单位为 μm。将上述数据代入公式(7)中,经过计算可得,该相机畸变测试的精度为 1.9 μm。

### 3 测试结果

文中用上述的测试和数据处理方法对被测相机进行了实际测试,测试现场照片如图 5 所示。测试时全视场共取 29 个测试点,进行了三次有效测试,经过数据处理得到各谱段线阵方向(X 方向)畸变如

图 6 所示,对应的各谱段最大相对畸变见表 1。



图 5 测试现场照片

Fig.5 Photo of testing field

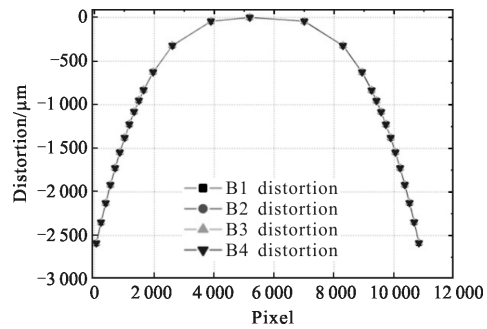


图 6 被测相机畸变曲线

Fig.6 Distortion curve of the camera under test

表 1 被测相机各谱段线阵方向最大相对畸变

Tab.1 Maximum relative radial distortion at all spectrums of the camera under test

Spectrum	B1	B2	B3	B4
Maximum relative radial distortion	3.699%	3.7%	3.696%	3.699%

通过对该相机光学系统 CODE-V 模型的畸变网络诊断可知,该相机线阵方向(X 方向)最大相对畸变设计值为 3.729%,垂直线阵方向(Y 方向)最大实际像高差不超过 5 μm。经过对比可以看出,文中提出的测试方法取得的测试结果与理论设计值吻合较好。三次重复测试,各采样点畸变测试的均方根为 1.8 μm,说明测试过程中随机误差较小,测试精度高。同时,也证明了该相机镜头装调阶段公差控制比较严格,可作为评价遥感相机整机性能的依据。

### 4 结论

文中介绍了一种航天非测绘大视场遥感相机畸变测试方法。用视场较大的近似无畸变光学镜头提供较大视场的目标,解决了光学系统有较大畸变的非测绘遥感相机畸变的精确测试。建立了针对大畸变光学系统畸变解算的数学模型,实现了较好的测试结果。实测结果显示,对被测相机可实现 1.8 μm(1σ)的畸变测试精度,表明该方法合理可行,

可以应用到光学系统具有较大畸变的航天遥感相机的畸变测试中,可为航天非测绘类遥感相机特别是视场较大的相机在研制过程中的畸变测试提供参考。

### 参考文献:

- [1] Li Deren. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 317-322. (in Chinese)  
李德仁. 我国第一颗民用三线阵立体测图卫星--资源三号测绘卫星[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 317-322.
- [2] Liu Jiangwei, Huang Haile, Li Wu. Research on method for the in-flight calibration of Mapping Satellite-1 high-resolution camera, multispectral camera and three-line-array nadir camera's intersection angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 662-667. (in Chinese)  
刘姜伟, 黄海乐, 李五. 天绘一号卫星高分辨、多光谱相机与三线阵正视相机夹角在轨标定方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 662-667.
- [3] Yu Da, Liu Jinguo, Zhou Huaide, et al. Design of LMCCD stereo mapping imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3393-3396. (in Chinese)  
余达, 刘金国, 周怀得, 等. LMCCD 立体测绘成像设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3393-3396.
- [4] Ohlhof T, Kornus W. Geometric calibration of digital three-line CCD cameras[C]//International Archives of Photogrammetry and Remote sensing, Como, Italy, 1994, 30: 71-81.
- [5] Pacey R E, Walker A S, Scheldt M. Calibration of analog and digital airborne sensors at LH systems[C]//ASPRS Annual Conference, 1999:950-956.
- [6] Schuster R. Sensor calibration and geometric calibration of a three line stereo camera [C]//International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1994, 30: 265-271.
- [7] Zhang Jiyou. Simulation of geometric measurement method for stereo mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 48-54. (in Chinese)  
张继友. 传输型立体测绘相机几何精度仿真分析[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 48-54.
- [8] Wu Guodong, Han Bing, He Xu. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(10): 1628-1632. (in Chinese)  
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.
- [9] Zhang Jiyou, Wang Dongjie, Ma Lina. The self-calibration technology of camera intrinsic parameters calibration methods [J]. *Imaging Science and Photochemistry*, 2016, 34 (1): 15-22. (in Chinese)  
张继友, 王东杰, 马丽娜. 摄像机内方位元素标定中的自标定技术[J]. 影像科学与光化学, 2016, 34(1): 15-22.
- [10] Liu Feng, Wang Xiangjun, Xu Wei, et al. Self-calibration method for the parallel tracking platform based on the monocular vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 175-179. (in Chinese)  
刘峰, 王向军, 许薇, 等. 并联跟踪台单目视觉自标定方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 175-179.
- [11] Yue Tao, Li Bo, Chen Xiaoli, et al. The current and future development of space optics [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 1-9. (in Chinese)  
岳涛, 李博, 陈晓丽, 等. 空间光学发展现状和未来发展 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 1-9.
- [12] Fu Ruimin, Zhang Yuanming, Zhang Jiyou. Study on geometric measurement methods for line-array stereo mapping camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(6): 62-67. (in Chinese)  
伏瑞敏, 张元明, 张继友. 传输型线阵测绘相机几何精度标定方法[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(6): 62-67.
- [13] Che Chicheng, Li Yingcai, Fan Xuewu, et al. Optical design of the parallel optical tube of the axial mirror [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2008, 37(9): 1793-1796. (in Chinese)  
车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 离轴二镜平行光管的光学设计[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1793-1796.
- [14] Chen Zhiling. Manufacture of wide view collimator for distortion calibration [J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(1): 71-74. (in Chinese)  
陈志凌. 用于畸变标定的大视场平行光管的研制[J]. 光学仪器, 2010, 32(1): 71-74.
- [15] Guo Jiang, Liu Jinguo, Wang Guoliang, et al. Technology of off-axis TMA aerospace mapping camera [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(S): 17-21. (in Chinese)  
郭疆, 刘金国, 王国良, 等. 测绘用离轴三反光学系统技术 [J]. 遥感学报, 2012, 16(S): 17-21.
- [16] Wu Xu, Fan Tianquan, Luo Mingrong, et al. Constraint least square optimization for distortion of an ultra-wide-angle optical lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 26-31. (in Chinese)  
吴旭, 范天泉, 罗名容, 等. 超广角光学镜头畸变的约束最小二乘优化[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 26-31.