

文章编号:1002-2082(2020)05-1032-05

超宽视场离轴光学系统畸变一致性校正技术

赵希婷, 张超, 冀翼, 刘辉, 焦文春, 黄阳, 李重阳, 张志飞

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 为满足海岸带超宽视场和高分辨率的动态监测需求, 高分辨率宽覆盖已成为空间光学遥感器的重要发展趋势。HY-1C/D 卫星海岸带成像仪采用两台相机组合的方式实现大幅宽, 单台相机是 32° 超宽视场离轴光学系统, 相机存在弧形畸变且畸变较大。研究了超大视场离轴光学系统畸变一致性校正技术, 提出“多变量仿真-高精密测量-交互迭代”的装调方法, 开展了兼顾像质、视轴、畸变的多变量全链路仿真计算, 通过高精度畸变测量系统实现了畸变补偿的交互迭代调整, 解决了镜头装调阶段畸变不可控的难题, 实现双台相机畸变一致性控制精度优于 0.1% , 完全满足测试技术要求, 结果表明方法合理可行。

关键词: 超宽视场; 计算机辅助装调, 离轴光学系统; 高精度焦距测量; 畸变一致性;

中图分类号:O439

文献标志码:A

DOI: [10.5768/JAO202041.0503005](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0503005)

Distortion consistency correction technique for ultra-wide field of view off-axis optical system

ZHAO Xiting, ZHANG Chao, JI Yi, LIU Hui, JIAO Wenchun,

HUANG Yang, LI Chongyang, ZHANG Zhifei

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to meet the requirements of ultra-wide field of view and high resolution dynamic monitoring in coastal zone, high resolution and wide coverage has become an important development trend of spatial optical remote sensors. The combination of two cameras was adopted by the HY-1C/D satellite coastal zone imager to realize the large width. The single camera is an 32° off-axis optical system with an ultra-wide field, and the camera has a large arc distortion. The distortion consistency correction technique for ultra-wide field of view off-axis optical system was mainly studied. The adjustment method of multivariate simulation-high precision measurements-interactive iteration was proposed, and the multivariable full-link simulation calculation with image quality, visual axis and distortion was carried out. Through the high precision distortion measurement system, the interactive iteration adjustment of the distortion compensation was realized, the problem of uncontrollable distortion in lens adjustment stage was solved, and the double camera distortion consistency control precision was better than 0.1% , which completely meet the test technical requirements. The results show that this method is reasonable and feasible.

Key words: ultra-wide field of view; computer-aided adjustment; off-axis optical system; high-precision focal length measurement; distortion consistency

引言

近年来, 随着光学遥感技术的快速发展, 为满足海岸带超宽视场和高分辨率的动态监测需求,

超宽视场离轴光学系统已成为空间光学遥感器的重要发展趋势^[1]。离轴光学系统具有更多设计自由度, 可消除轴外像差, 具有更加优异的性能, 能

收稿日期:2020-01-15; 修回日期:2020-07-25

基金项目:国家自然科学基金(11304012);国家重点研发计划地球观测与导航重点专项(2016YFB0500503)

作者简介:赵希婷(1983-),女,硕士,高级工程师,主要从事离轴光学装调与测试方面的研究。E-mail: 19965426@qq.com

实现更大视场范围内各性能达到指标, 满足相机大幅宽的要求。

本文介绍的某海岸带成像仪相机采用两台超宽视场离轴光学系统, 单台光学系统视场角为 $32^\circ \times 1.3^\circ$, 相机存在弧形畸变且畸变较大。光学设计最大相对畸变 $<4\%$, 相机畸变和线阵平行性不一致, 都将直接导致最终两台相机图像的拼接质量, 因此开展畸变一致性装调校正十分必要。

目前国内外现有的计算机辅助光学系统装调技术都是通过光学零件装调, 使得 RMS 波像差最小^[2], 而并不以畸变作为评价指标, 传统装调方法在镜头装调阶段难以开展有效的畸变均衡校正。

1 畸变一致性校正技术

1.1 全链路畸变仿真计算

在计算机辅助装调的方式中, 其中常用的一种方式为“反向优化法”^[2-3], 对系统进行失调仿真, 将设计好的理论系统人为加入失调, 建立起系统失调状态的模型库, 得到各镜偏转方向与像质、视轴、畸变的多变量全链路仿真计算^[4], 从而指导离轴光学系统镜头阶段像质和畸变的均衡校正调整。

将主镜、次镜和三镜各项最大公差输入到 CODEV 光学设计软件中, 选取初级像差作为校正对象进行仿真, 计算离轴三反光学系统在不同偏心、倾斜量值下出瞳面的像差和相对畸变^[5-7]。图 1 列出了各反射镜(主镜、次镜和三镜)和失调量对三阶像差的影响, 如彗差、像散和绝对畸变值的变化。

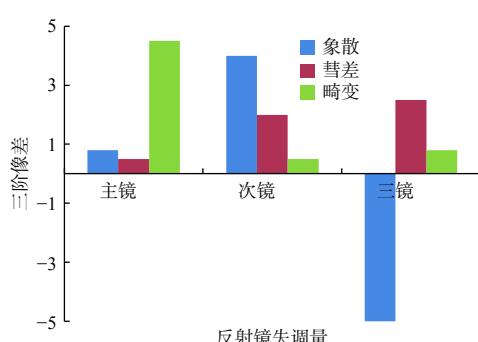


图 1 各反射镜失调量对三阶像差和畸变的影响

Fig. 1 Influence of mirror misalignment on third-order aberration and distortion

由于该系统畸变为弧形, 仿真计算分析主镜倾斜和平移对像散、彗差和绝对畸变值的影响, 如表 1 所示。

表 1 主镜失调量对像差和畸变的影响

Table 1 Influence of primary mirror misalignment on aberration and distortion

参数	主镜 T_x	主镜 T_y	主镜 D_x	主镜 D_y
Δ 象散/ λ	-0.18	0.13	-0.14	0.14
Δ 彗差/ λ	0.05	-0.05	-0.18	0.18
Δ 绝对畸变/mm	0.35	-0.35	0.07	-0.07

从图 1 和表 1 可以看出, 主镜对像散影响较小, 但对畸变影响较大, 而次镜和三镜对像差影响较大。因此, 通过次镜和三镜对光学系统波像差进行校正, 通过主镜 T_x 和 T_y 对光学系统畸变进行校正。

1.2 高精度畸变测量

以往的畸变测量方法如精密测角法^[8]等受人文因素影响较大, 测量结构不稳定^[9]。本文结合工作实践, 采用干涉仪、光电自准直仪和激光跟踪相结合的光学系统畸变测量方法^[10-11], 并根据实际测量值对镜头畸变进行一致性装调校正。图 2 给出了利用干涉仪、光电自准直仪、激光跟踪仪和跟踪仪靶球搭建的测量光路。

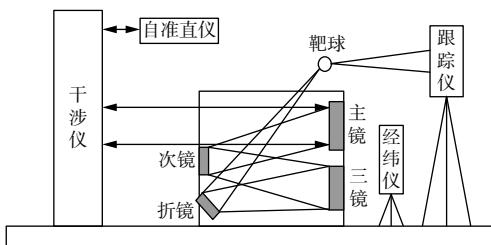


图 2 测量光路示意图

Fig. 2 Schematic of measuring optical path

该方法利用干涉仪接收到的光波波前 power 值对球面反射镜位置非常敏感的特性, 并结合激光跟踪仪的空间几何量精密测量, 可精确测量光学系统轴上和轴外视场的像高, 并结合光电自准直仪的精密测角, 可实现光学系统焦距的高精度测量。测试步骤如下:

- 首先利用干涉仪建立光学系统轴上视场和轴外视场的波前测试光路;
- 跟踪靶球放置在光学系统焦面位置, 调整靶球使得干涉条纹成为零条纹, 使用跟踪仪记录靶球的空间位置(x_1, y_1, z_1), 使用光电自准直仪测量干涉仪平面反射镜的法线角度值(h_1, v_1);
- 将干涉仪偏转一定的角度(约 0.2°), 记录跟踪仪靶球的空间位置(x_2, y_2, z_2)和干涉仪平面反射镜的法线角度值(h_2, v_2);

根据两次记录的跟踪仪靶球的空间位置和干涉仪平面反射镜的法线角度值,按(1)式和(2)式可计算得出被测光学系统的焦距值为

$$f = \frac{d}{\tan \theta} \quad (1)$$

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arccos(\cos(h_2 - h_1) \cdot \cos(v_2 - v_1)) \quad (3)$$

式中: f 为被测光学系统焦距; d 为跟踪仪靶球的空间位置变化量; θ 为干涉仪平面反射镜的法线角度变化量。

4) 绝对畸变^[12]在数值上是以理论像高 h 和主光线与理想像面相交的实际像高 H 之差 D'_r 表示

$$D'_r = H - h = (f'_\omega - f'_0) \operatorname{tg} \omega \quad (4)$$

式中: f'_ω 和 f'_0 分别为不同视场焦距和中心视场焦距。光学设计中常用上述像高差 D'_r 相对于理论像高 h 的百分比 q' 表示,称之为相对畸变

$$q' = \frac{H - h}{h} \times 100 = \frac{f'_\omega - f'_0}{f'_0} \times 100\% \quad (5)$$

相对畸变值 q' 表示了光学系统不同视场下焦距值的不同。

2 实际装调

某海岸带离轴光学系统沿线阵方向(X 方向)的畸变较大^[13],且垂直线阵方向(Y 方向)存在弧形畸变。该相机线阵方向(X 方向)最大相对畸变设计值为3.729%,边缘视场在 Y 方向的畸变约为1.9 mm,如图3所示。

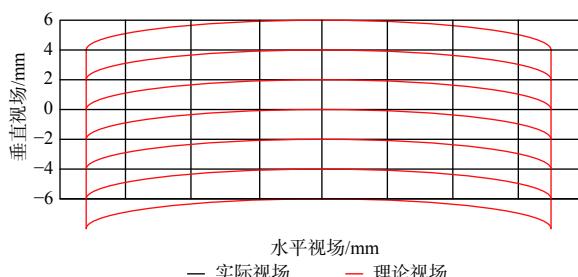


图3 光学系统畸变图

Fig. 3 Distortion grid of optical system

该相机CCD光敏区宽度为2.2 mm,CCD器件在成像区域中的位置如图4所示,要求 $(0^\circ, 0^\circ)$ 中心视场在焦面上的像点与焦面B4谱段下边缘距离0.5 mm, $(16^\circ, 1.3^\circ)$ 和 $(-16^\circ, 1.3^\circ)$ 边缘视场在焦面上的像点与焦面B1谱段上边缘距离0.6 mm,如图4所示。

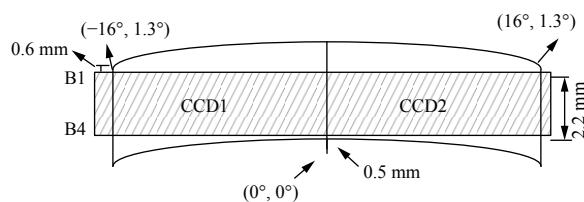


图4 CCD器件在成像区域中的位置

Fig. 4 Position of CCD device in imaging region

为了使得CCD焦面放置在整个成像区域的中心位置,同时还要求两台相机的焦面线阵平行性优于 $1'$,这就要求镜头在系统精密装调阶段对弧形畸变进行一致性校正调整。

首先,根据自准干涉测量得到超宽视场离轴光学系统轴上和轴外各视场的波像差,使用计算机辅助装调求解出光学系统失调量,求得三镜和次镜自由度的变量值和方位进行像质精密调整,测试光路如图5所示。



图5 装调测试现场

Fig. 5 Adjustment and test site

其次,根据高精度畸变测试系统进行畸变测量,干涉仪的偏转角度和跟踪仪靶球的空间位置变化量按(1)式得到光学镜头边缘视场的焦距,从而获得镜头绝对畸变曲线。通过自编软件解算主镜的倾斜量作为自变量进行优化计算,使得弧形视场两边视场的绝对畸变差值最小。通过对镜头畸变进行2次迭代调整和测试,最终镜头畸变校正前后的曲线测试如图6所示。

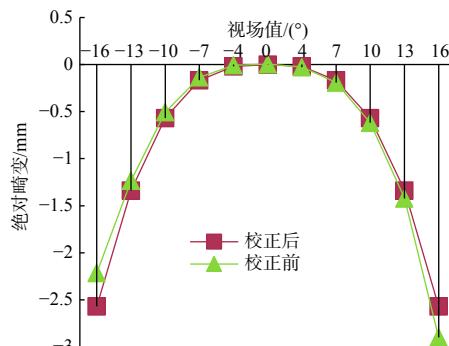


图6 绝对畸变校正前后曲线对比

Fig. 6 Comparison of curves before and after absolute distortion correction

最后, 再通过三镜的倾斜量对镜头像质进行补偿调整^[14-15]。最终, 波长为 632.8 nm 的各个视场波像差平均值满足了光学系统成像质量的要求。

工程中对两台超宽视场离轴光学系统进行了实际畸变装调校正, 两台相机最终的最大相对畸变和波像差值如表 2 所示。

表 2 两台相机测试结果

Table 2 Test results of two cameras

	最大相对畸变/%	全视场平均波像差/ λ
相机1	3.749	0.072
相机2	3.651	0.068

两台相机最后相对畸变控制一致性精度优于 0.1%, 全视场平均波像差都满足指标要求。

3 结论

本文开展了兼顾像质和畸变的多变量全链路仿真, 建立了高精密畸变测量系统, 实现了超宽离轴光学系统畸变补偿的交互迭代调整。实验结果表明, 该方法测量精度高, 具有较高的重复性和实用性。

参考文献:

- [1] CHEN Hu, LI Yang. 60 years technical achievements and prospects of BISME[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2018, 39(4): 1-9.
陈虎, 李扬. 北京空间机电研究所60年技术成就与展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(4): 1-9.
- [2] ZHAO Xiting, JIAO Wenchun, LIAO Zhibo, et al. Study on computer-aided alignment method of a three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. SPIE, 2010(7656): 1-6.
赵希婷, 焦文春, 廖志波, 等. 离轴三反系统计算机辅助装调技术研究[J]. SPIE, 2010(7656): 1-6.
- [3] ZHAO Xiting, JIAO Wenchun, LIAO Zhibo, et al. High precision metrology method for unobscured Three Mirror Anastigmatic(TMA) mapping camera boresight[J]. SPIE, 2012(8417): 1-6.
赵希婷, 焦文春, 廖志波, 等. 离轴三反式测绘相机高精度视轴引出方法研究[J]. SPIE, 2012(8417): 1-6.
- [4] YUE Pengyuan, ZHAO Xiting, ZHAO Zhen, et al. Computer-aided alignment method in afocal compressed optical path system[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(4): 607-611.
岳鹏远, 赵希婷, 赵振, 等. 无焦压缩光路系统的计算机辅助装调方法[J]. 应用光学, 2016, 37(4): 607-611.
- [5] WANG Chunyu, HUANG Yang, WANG Cong, et al. High precision reconstruction and adjustment technique for surface figure error of the off-axis reflective system[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2020, 41(2): 58-66.
王春雨, 黄阳, 王聪, 等. 离轴反射式系统面形误差高精度还原装调技术[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(2): 58-66.
- [6] WANG Bin, WU Fan, YE Yutang, et al. Computer aided alignment for off-axis TMA system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 250-256.
王斌, 伍凡, 叶玉堂, 等. 离轴三反系统计算机辅助装调[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 250-256.
- [7] ZHANG Chao, WEI Xuemin, ZHAO Xiting, et al. Computer-aided alignment technology of multi-spectral camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 160-166.
张超, 魏学敏, 赵希婷, 等. 多光谱相机计算机辅助装调方法[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 160-166.
- [8] GUO Jikai, WANG Zhile, LU Min. Off-axis three-mirror anastigmatic system alignment and application based on principal component analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 341-347.
郭继锴, 王治乐, 陆敏. 基于主成分分析法的离轴三反系统装调及其应用[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 341-347.
- [9] ZHAO Jianke, ZHOU Yan. High precision distortion measurement of NFOV long-focus lens[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(3): 380-384.
赵建科, 周艳. 小视场长焦距镜头畸变高精度测量研究[J]. 应用光学, 2008, 29(3): 380-384.
- [10] GUO Yu, YANG Hong, YANG Zhaojin, et al. Distortion measurement of lens in CCD camera system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2): 279-282.
郭羽, 杨红, 杨照金, 等. CCD摄像系统镜头的畸变测量[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 279-282.
- [11] HUANG Yang, WANG Chunyu, NIU Jinchuan, et al. High-precision measurement of focal length for long-focus infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 995-998.
黄阳, 王春雨, 牛锦川, 等. 长焦红外光学系统焦距的高精度测量技术[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 995-998.
- [12] WANG Shengyun, ZHENG Xue, YANG Hong, et al. Explanation of calibration specification for IR optical focal

- length measuring equipment[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(6): 806-808.
- 王生云, 郑雪, 杨红, 等. 红外光学系统焦距测量装置校准规范说明[J]. 应用光学, 2007, 28(6): 806-808.
- [13] LI Chongyang, DONG Xin, YUE Liqing, et al. Testing method of distortion for space remote sensing camera with large field of view[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 217-221.
- 李重阳, 董欣, 岳丽清, 等. 航天大视场遥感相机畸变测试方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 217-221.
- [14] ZHAO Yue, LI Hua, KANG Shifa, et al. Alignment of zoom optical system based on aberration feature analysis[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(2): 389-393.
- 赵岳, 李华, 康世发, 等. 基于像差特征分析的变焦光学系统装调[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 389-393.
- [15] LI Bin, CHEN Jiayi, WANG Haichao, et al. Accuracy angular measurement method in alignment process for Cassegrain telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 958-962.
- 李斌, 陈佳夷, 王海超, 等. 卡塞格林系统装调过程中高精度测角方法[J]. 应用光学, 2017, 38(6): 958-962.