

文章编号: 1002-2082 (2020) 05-0911-05

共轴三反光学系统卧式装调技术

王海超, 陈佳夷, 霍腾飞, 李 斌, 刘君航

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘 要: 共轴三反光学系统是空间光学遥感器常用的设计形式, 以“高分一号”遥感卫星高分辨率相机装调为例, 对共轴三反系统计算机辅助装调技术进行了研究。提出以主镜光轴为装调基准, 通过调整三镜控制系统视场和调整次镜控制系统像差的装调方法, 分析了次镜和三镜的失调量与 Zernike 系数变化关系, 由光学设计软件求得系统灵敏度矩阵, 用于指导系统装调工作, 提高了装调精度, 缩短了装调周期。测试结果表明: 光学系统各视场 Zernike 系数优于 0.05λ , 系统波相差 RMS 值优于 0.06λ , 系统通过在轨成像测试, 图像清晰, 层次丰富。

关键词: 计算机辅助装调; 共轴三反系统; Zernike 系数; 遥感卫星

中图分类号: TN206; TH743

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0501006

Horizontal alignment technology of coaxial three-mirror optical system

WANG Haichao, CHEN Jiayi, HUO Tengfei, LI Bin, LIU Junhang

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

Abstract: Coaxial three-mirror optical system is a popular optical system design form in space optical remote sensor. Taking the alignment of high-resolution camera of the GF-1 sensing satellite as an example, the computer-aided alignment technology of coaxial three-mirror optical system was researched. The primary mirror optical axis was set as the benchmark. By adjusting the alignment methods of three-mirror control system field of view and secondary mirror control system aberration, the changes in the relationship between the misalignment rate of secondary mirror and three-mirror and Zernike coefficient were analyzed. The system sensitivity matrix was obtained by the optical design software to guide the system alignment, which improved the accuracy of alignment and shortened the period of alignment. Test results show that the Zernike coefficient of each field of view in optical system is better than 0.05λ , and the RMS value of system wave aberration is better than 0.06λ . The system passes the on-orbit imaging test with clear and multilayer images.

Key words: computer-aided alignment; coaxial three-mirror optical system; Zernike coefficient; remote sensing satellite

引言

光学系统计算机辅助装调技术是利用计算机测试技术通过相应手段调整系统中各个光学元件位置姿态, 使光学系统满足焦距、视场等相关技术指标要求, 最终获得清晰图像的过程。

目前, 共轴三反式光学系统一般的装调思路是, 先建立主镜-次镜系统测试一次像^[1-2], 调整主镜-次镜系统并使其达到一定的指标要求, 然后调

整三镜位姿使系统满足指标要求。这种装调方式较为明显的弊端有, 一是主镜-次镜系统残留较大像差, 从而导致测试精度降低, 以该系统为例, 一次像球差约为 0.2λ ($@632.8\text{ nm}$), 一般情况下, 球差可通过补偿器或者相位平板^[3]补偿, 但对于同轴系统而言, 一次像一般在主镜通光孔内, 架设补偿器难度较大, 可行性较差; 二是由于三镜滞后调整, 在其调整阶段一般以补偿像差为主, 不能有效控

收稿日期: 2019-12-17; 修回日期: 2020-04-20

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 王海超 (1987-), 男, 工程师, 主要从事光学遥感器反射式光学系统装调与测试工作。E-mail: 651174826@qq.com

制光学系统的视轴和后截距,造成系统焦平面倾斜,从而导致成像系统集成结构干涉;三是此方法分两步调整,装调效率较低。

本文以“高分一号”光学遥感卫星空间光学遥感器装调为例,介绍了一种新装调思路,即以主镜为基准,调整三镜位姿控制视轴,调整次镜位姿补偿像差,使系统失调量快速收敛,从而达到更好的成像效果。

1 光学系统公差分析及系统装调

1.1 光学系统介绍

“高分一号”卫星在轨图像如图 1 所示(迪拜棕榈岛拍摄)。“高分一号”卫星光学遥感器对地分辨率 2 m,光学系统通光口径 330 mm,焦距 3 300 mm,相对孔径 1/10。其主镜、次镜、三镜均为二次非球面反射镜^[4],与焦面折转平面镜组成共轴三反系统,如图 2 所示。主镜-次镜间距为 344.784 mm;主镜-三镜间距为 366.857 mm。为满足光学系统在轨成像要求,系统各个视场波前误差 RMS 应优于 $1/15 \lambda$,视轴偏差优于 $3'$,次镜倾斜公差为 $3''$,三镜倾斜公差为 $10''$ 。



图 1 高分一号卫星在轨图像

Fig. 1 Satellite on-orbit image

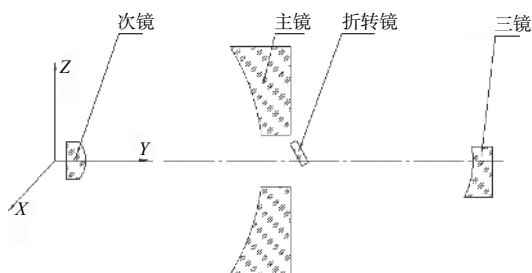


图 2 反射镜调整坐标系

Fig. 2 Speculum adjustment coordinate system

系统装调以主镜光轴为基准。焦面折转镜直接影响焦面位置,所以首先调整焦面折转镜至理论位置,然后调整三镜的 5 个自由度,即三镜顶点

与主镜顶点间距 H_t 、三镜沿 X 方向偏心量 D_{tx} 、三镜沿 Z 方向偏心量 D_{tz} 、三镜绕 X 轴旋转 R_{tx} 、三镜绕 Z 轴旋转 R_{tz} ;调整次镜的 5 个自由度,即次镜顶点与主镜顶点间距 H_s 、次镜沿 X 方向偏心量 D_{sx} 、次镜沿 Z 方向偏心量 D_{sz} 、次镜绕 X 轴旋转 R_{sx} 、次镜绕 Z 轴旋转 R_{sz} ,直至光学系统满足要求,结束系统调整。

1.2 公差分析

定义平行于主镜光轴的光束为轴上光线,即系统的中心视场,以线阵方向 2 个边缘视场分别为+1 视场和-1 视场。利用 CODE V 软件计算次镜与三镜失调量对光学系统 Zernike 系数变化关系,求得灵敏度矩阵如表 1 和表 2 所示。

表 1 次镜灵敏度矩阵

Table 1 Secondary mirror sensitivity matrix

视场	$H_s=0.05 \text{ mm}$	$D_{sx}=0.05 \text{ mm}$	$D_{sz}=0.05 \text{ mm}$	$R_{sx}=5''$	$R_{sz}=5''$
中心场 Z_5	-0.011 4	0	0.023 3	-0.008 9	0
Z_6	0	-0.023 2	0	0	-0.008 9
Z_7	0	-0.313 1	0	0	-0.019 9
Z_8	0.009 3	0	-0.312 9	0.019 9	0
Z_9	0.03	0	-0.000 2	0	0
+1 视场 Z_5	0.119 5	0.080 7	0.023 6	-0.008 9	0.029 1
Z_6	-0.076	-0.026 3	0.078 5	-0.028 9	-0.009 3
Z_7	-0.033 3	-0.310 7	-0.000 3	0.000 1	-0.019 8
Z_8	0.010 4	-0.000 4	-0.311 8	0.02	0
Z_9	0.03	0.000 5	0	0	0
-1 视场 Z_5	0.109 7	-0.080 7	0.023 6	-0.008 9	-0.029 1
Z_6	0.076	-0.026 2	-0.078 5	0.028 9	-0.009 2
Z_7	0.033 3	-0.310 7	0.000 3	-0.000 1	-0.019 9
Z_8	0.010 4	0.000 4	-0.311 8	0.02	0
Z_9	0.03	-0.000 5	0	0	0

1.3 建立基准

传统方法是以主镜机械机构作为光学装调的基准,不能满足成像系统的视轴偏差要求,以主镜光轴作为装调基准可有效避免光学加工引入的光轴偏差^[5]。主镜是椭球面反射镜^[6],非球面系数 $K=-0.961 8$,接近于抛物镜^[7]。将其置于大口径平面波光路中,此时平面波经过主镜反射后的汇聚点处有较大的球差,在汇聚光路中插入一定厚度的平板玻璃,用于补偿光路产生的球差,调整系统彗差至 0,此时平行光方向即为主镜光轴,并将主镜光轴数据引至基准镜上,此方法测试精度优于 $1''$ 。

1.4 焦面折转镜装调

以主镜光轴为基准^[8-9],使用光电经纬仪测试折

表 2 三镜灵敏度矩阵

Table 2 Three-mirror sensitivity matrix

视场	$H_t=0.05\text{ mm}$	$D_{tx}=0.05\text{ mm}$	$D_{tz}=0.05\text{ mm}$	$R_{tx}=5''$	$R_{tz}=5''$
中心场 Z_5	0.004 7	-0.000 4	-0.000 5	0.002 6	-0.008 5
Z_6	-0.003 2	-0.000 9	0	0.008 4	0.002 7
Z_7	-0.004 4	0	-0.008 5	0.000 1	-0.000 6
Z_8	0.001 4	-0.008 9	-0.000 1	0.000 7	0
Z_9	0.000 3	0.000 1	-0	0	0
+1视场 Z_5	-0.000 5	-0.000 3	0	0.002 5	0
Z_6	0	0	0.000 3	0	0.002 6
Z_7	0	0	-0.008 7	0	-0.000 7
Z_8	0.001 4	-0.008 6	0	0.000 7	0
Z_9	0.000 3	0	0	0	0
-1视场 Z_5	0.004 7	-0.000 4	0.000 6	0.002 6	0.008 5
Z_6	0.003 2	0.000 9	0	-0.008 4	0.002 7
Z_7	0.004 4	0	-0.008 6	-0.000 1	-0.000 7
Z_8	0.001 4	-0.008 9	0	0.000 7	0
Z_9	0.000 3	0.000 1	0.000 1	0	0

转镜角度。设置经纬仪相对水平角度为 0, 记录经纬仪测试干涉仪平行光的读数 V_0 、 H_0 , 其空间向量为 $\mathbf{a}(a_x, a_y, a_z)$, 测试经纬仪自准直^[10]于折转镜的读数 V_1 、 H_1 , 则折转镜的镜面法线空间向量为 $\mathbf{b}(b_x, b_y, b_z)$, 以经纬仪 ($0^\circ/90^\circ$) 和 ($270^\circ/90^\circ$) 分别为 +X 和 +Y 方向建立坐标系 (同图 2 所示坐标系)。在经纬仪坐标系中 $\mathbf{a}$ 向量和 $\mathbf{b}$ 向量的分量可分别表示为

$$a_x = \sin V_0 \cos H_0$$

$$a_y = -\sin V_0 \cos H_0$$

$$a_z = \cos V_0$$

$$b_x = \sin V_1 \cos H_1$$

$$b_y = -\sin V_1 \cos H_1$$

$$a_z = \cos V_1$$

根据空间向量积公式:

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \cos \theta = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|}$$

可求得 2 个向量夹角 θ , 调整折转镜调节垫片厚度, 使得夹角 θ 满足要求。

1.5 失调量调整

以干涉检验法测试以波像差作为评价判据, 即测量系统像质时, 光学系统出射的含有光学系统光程差信息的光波面与参考波面发生干涉, 可获得光学系统的波像差^[11]。对于干涉测试法所得到的系统波前像差^[12], 可以由 Zernike 多项式^[13]来表

示, 如表 3 所示。光学系统采用卧式装调方式, 搭建测试光路, 如图 3 所示。使用大口径平面波干涉仪测试时, 平行光波依次通过主镜、次镜、三镜、焦面折转镜后反射, 汇聚到标准球面反射镜, 使光波沿原路返回至干涉仪, 形成干涉条纹。

表 3 Zernike 多项式

Table 3 Zernike polynomials

	极坐标	像差
Z_5	$\rho^2 \cos 2\phi$	Astigmatism 0° or 90°
Z_6	$\rho^2 \sin 2\phi$	Astigmatism 45°
Z_7	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \phi$	Coma X
Z_8	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \phi$	Coma Y
Z_9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Primary spherical

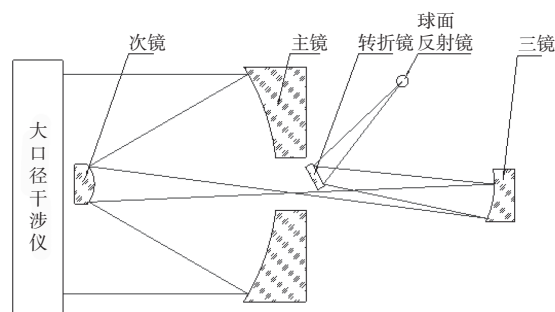


图 3 光学系统装调测试光路

Fig. 3 Optical system alignment testing optical path

由三镜灵敏度矩阵和实践经验可知, 三镜的位置姿态对系统的视轴指向及视场影响较大, 对系统像差影响较小, 所以首先调整三镜位姿确认光学系统中心视场。具体方法是, 保持主镜光轴与干涉仪平行光方向一致, 调整三镜沿 Z 方向偏心量 D_{tz} 及三镜绕 Z 轴旋转 R_{tz} , 使平行光经过光学系统的像落在模拟 CCD 器件中心像元^[14]上, 即系统的中心视场, 如图 4 所示。

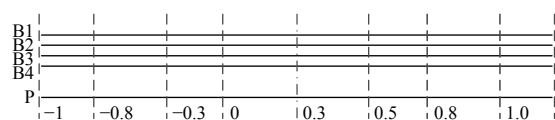


图 4 模拟 CCD 器件

Fig. 4 Simulation of CCD devices

根据测试中心视场成像质量结果, 通过测试软件解析可得 Z_5 、 Z_6 、 Z_7 、 Z_8 、 Z_9 。由次镜灵敏度矩阵可知主镜与次镜间距直接影响系统的像散、彗差和球差, 且次镜的其他几个自由度^[15]的调整不会影响系统的球差。因此, 首先调整次镜与主镜距离 H_s , 直至中心视场球差小于 $1/30\lambda$ 。次镜倾斜影响系统像散和彗差, 调整次镜倾斜 R_{sx} 、 R_{sz} , 使系统

像散优于 $1/30\lambda$ 。次镜偏心对系统彗差影响比较明显,调整次镜偏心 D_{sx} 、 D_{sz} ,直至系统彗差优于 $1/30\lambda$ 。

再次调整三镜位置姿态以纠正次镜调整导致中心视场像点的位置偏差,随后调整次镜位置姿态补偿像差,测试轴外视场 Zernike 系数,调整次镜使轴外视场像散和彗差收敛,直至各视场像质满足要求,这是一个多次迭代的过程。

表 4 装调结果

Table 4 Alignment results						
视场	$Z_5(\lambda)$	$Z_6(\lambda)$	$Z_7(\lambda)$	$Z_8(\lambda)$	$Z_9(\lambda)$	RMS(λ)
0视场	-0.050	0.043	0.020	0.048	0.006	0.055
+1视场	-0.016	0.048	0.050	0.043	-0.009	0.056
-1视场	-0.009	-0.050	-0.047	0.034	0.013	0.056

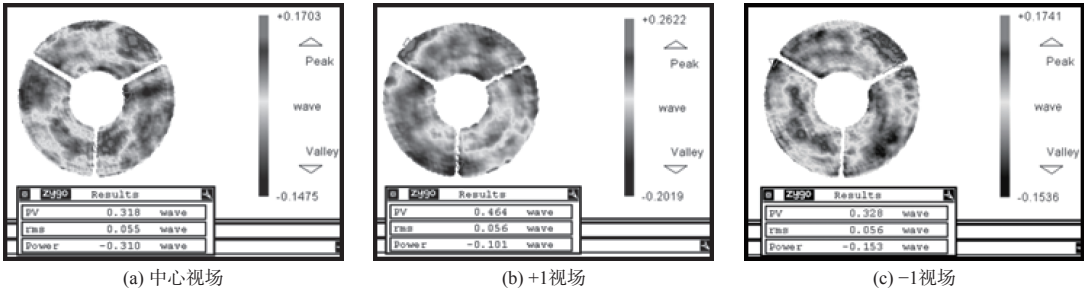


图 5 光学系统各视场干涉图

Fig. 5 Interferogram of each field of view in optical system

3 结论

以“高分一号”遥感卫星高分辨率遥感相机装调过程为例,提出了一种共轴三反光学系统装调思路,以主镜光轴为装调基准,以三镜位姿控制系统视场和视轴,以次镜位姿控制系统像质,应用计算机辅助装调技术建立了次镜、三镜位置姿态与 Zernike 系数的关系,缩短了装调周期,取得了较好的效果,相机在轨成像清晰,层次丰富,验证了装调工作的正确性。

参考文献:

[1] LIU Bo, DING Yalin, JIA Jiqiang, et al. Computer aided alignment of R-C optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0318001-1-6.

刘波,丁亚林,贾继强,等. R-C光学系统的计算机辅助装调[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0318001-1-6.

[2] ZHANG Xiangming, JIANG Feng, KONG Longyang, et al. Research on optical alignment technology for Cas-segrain system[J]. Journal of Applied Optics, 2015,

2 装调结果

经过几轮迭代调整,光学系统各视场 Zernike 系数都调整到 $1/20\lambda$ 以内,如表 4 所示。由表 4 可知,中心视场 RMS 值为 0.055λ ,+1 视场 RMS 值为 0.056λ ,−1 视场 RMS 值为 0.056λ ,均满足设计要求。装调后光学系统各视场干涉图如图 5 所示。

36(4): 526-530.

张向明,姜峰,孔龙阳,等. 卡塞格林系统光学装调技术研究[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 526-530.

[3] LI Mengjuan, LIAO Zhibo, WANG Chunyu. Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refraction optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 36(2): 277-281.

栗孟娟,廖志波,王春雨. 小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 277-281.

[4] LI Xiaoyan, FU Xing, WANG Peng, et al. Alignment method of aspheric optical reflector[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(3): 498-502.

李小燕,付兴,王鹏,等. 非球面光学反射镜的装调方法[J]. 应用光学, 2013, 34(3): 498-502.

[5] JIN Weiqi, WANG Xia, ZHANG Qiyang, et al. Technical progress and its analysis in detecting of multi-axes parallelism[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 526-531.

金伟其,王霞,张其扬,等. 多光轴一致性检测技术进展

- 及其分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 526-531.
- [6] PAN Junhua. The design manufacture and test of the aspherical optical surface[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.
- 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [7] AN Liansheng. Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2003: 166-169.
- 安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003: 166-169.
- [8] LI Bin, CHEN Jiayi, WANG Haichao, et al. Optical axis elicitation method for ellipsoidal mirror[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(6): 791-795.
- 李斌, 陈佳夷, 王海超, 等. 椭球面反射镜的光轴引出方法[J]. *应用光学*, 2018, 39(6): 791-795.
- [9] SONG Junru, XING Hui, MU Shengbo, et al. Alignment of aerial multi-angle infrared camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2125-2133.
- 宋俊儒, 邢辉, 穆生博, 等. 航空红外相机的装调[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2125-2133.
- [10] YUE Liqing, ZHANG Jiyu. Alignment method of axis angle and linear array parallelism for three-line array mapping camera[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2012, 33(3): 35-40.
- 岳丽清, 张继友. 三线阵相机视轴夹角及线阵平行性装调测试[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(3): 35-40.
- [11] LI Xuyang, LI Yingcai, MA Zhen. Computer-aided alignment method of coaxial three-mirror-anastigmat system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(6): 901-906.
- 李旭阳, 李英才, 马臻. 折轴三反射光学系统的计算机辅助装调技术[J]. *应用光学*, 2009, 30(6): 901-906.
- [12] SHI Guangwei, ZHANG Xin, ZHANG Ying, et al. Alignment of two-mirror optical system based on vector wavefront aberration[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3): 540-544.
- 史广维, 张新, 张鹰, 等. 基于矢量波像差理论的两反光学系统装调研究[J]. *应用光学*, 2011, 32(3): 540-544.
- [13] GONG Dun, TIAN Tieyin, WANG Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by Zernike coefficients[J]. *Optic and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1754-1759.
- 巩盾, 田铁印, 王红. 利用Zernike系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1754-1759.
- [14] ZHANG Jian, ZHANG Linghua, LIU Liguang, et al. Necessity and implement method of precise assembling of TDI CCD in sweep aerial remote sensor[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 996-1002.
- 张健, 张玲花, 刘立国, 等. 全景式航空遥感器TDI-CCD精密装调必要性分析及实现方法[J]. *中国光学*, 2014, 7(6): 996-1002.
- [15] LIU Lei, LI Jinglin, LYU Qingtao. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(z1): 134-137.
- 刘磊, 李景林, 吕清涛. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(z1): 134-137.