

## 透射式光学系统计算机辅助装校技术初步研究

廖志波,王春雨,栗孟娟,伏瑞敏

(北京空间机电研究所,北京 100190)

**摘要:**应用于航天遥感领域的透射式光学镜头光学元件多,分离变量多,结构复杂,成像质量要求接近衍射极限,对光学装调有着苛刻的要求。传统的透射式系统装调一般采用直装定心的方法,通过机床定心和实验室定心结合依次将各个元件的偏心和倾斜调整到预设置公差范围之内。这种方法增加了过程控制的难度,影响了装调一次成功率。在透射式系统装调中引入计算机辅助装调技术是突破传统装调方法,提高系统装调质量和效率行之有效的手段。借助计算机辅助装调技术,通过设置补偿环节的方法针对某一透射式光学镜头的初级像差进行调整,成功将系统装调结果 RMS 从  $0.084\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) 提高到  $0.046\lambda$ , 实现了高精度、高效率的装调。

**关键词:**透射式光学镜头; 计算机辅助装调; 补偿调整

**中图分类号:** V44    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2453-04

## Research on computer-aided alignment based on refract optical system

Liao Zhibo, Wang Chunyu, Li Mengjuan, Fu Ruimin

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Refract optical system using in remote sensing usually has many elements, complicated structure, and diffraction limited image quality, which makes the assemble puzzled. The tradition way is to alignment each optical element piece by piece, through the device designed to measure the surface tilt error of spherical surfaces with respect to a reference axis. It is time consuming, and worse than all the result is uncertain of successful. In this paper, the method of computer aid alignment was introduced as an assistant to avoid strict process control and reduce the difficulty. A example releases that when a special sensitively variables like distance between two lens is chosen as compensator to reduce the primary aberration after optimization of the optical system, it is effective and convenient to raise the optical system wavefront error RMS from  $0.084\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ) to  $0.046\lambda$ .

**Key words:** refract optical system; computer aid alignment; compensator

收稿日期:2013-01-23; 修订日期:2013-02-28

基金项目:国家重大科技专项

作者简介:廖志波(1981-),男,高级工程师,硕士,主要从事光学检测及光学仿真方面的研究。Email:bitliaoqb@126.com

### 0 引言

随着遥感器研制技术的发展,高性能透射式光学系统大量应用,传统装调方法已无法满足研制技术需要。计算机辅助装校(CAA)技术是针对传统装调方法存在不可视、不定量、随机成分多、装调周期长等缺点提出的一种新的装调手段,以往主要应用在反射式特别是离轴三反系统的装调中<sup>[1-7]</sup>。在透射式光学系统中,由于光学元件较多,需控制变量多,失调量确定难度大,计算机辅助装校(CAA)技术应用很有限。文中提出借助计算机辅助装校技术,在系统中设置补偿环节,确定失调量补偿方案,通过对补偿环节的调整来实现透射式镜头高精度、高效率装校。并通过一个实例镜头的装调验证了该方法的有效性。

### 1 计算机辅助装校流程

计算机辅助装校技术是将光学测量与计算机优化技术相结合,将计算机技术应用于光学系统装调的一项新技术。系统初装完成后,通过干涉检测等方法得到系统出瞳波面上各视场波像差,与理论结果进行对比分析,利用 CODE V 或 ZEMAX 等专业软件进行计算机优化计算,确定系统失调量情况,从而指导装调过程,使每次重新调整后的光学系统实测波像差尽可能地接近设计值,最终保证系统质量满足设计要求。计算机辅助装校流程如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

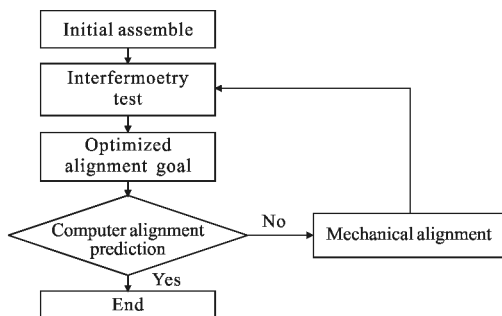


图 1 计算机辅助装校流程  
Fig.1 Flow chart of CAA

计算机辅助装校中的关键是确定系统的失调量,即通过计算机对测得的包含系统失调因素的像质指标进行数据分析和处理,得到光学系统相关装校参量的失调情况。

### 2 CAA 技术在透射式光学系统装调中的应用

透射式光学系统元件较多,需控制的调整参数多,对引起系统像差的失调量的准确定位难度大,加大了计算机辅助装校技术在透射式系统中的应用难度。但通过传统精密定心法完成初装调的透射式系统,各光学元件形位失调量已经很小,可以尝试借助计算机辅助装校技术对系统存在像差进行分析,通过调整某个或某组透镜的位置来补偿整个系统的失调,从而减小系统像差,改变传统装调的经验式、盲目性调整,提升装调质量和效率。

图 2 为某相机光学系统图,图 3 是部分结构形式示意图。该光学系统采用透射式准像方远心光路,系统焦距长、相对孔径小,光学系统传递函数接近衍射极限,系统畸变要求高,对光轴一致性有着严格的要求。但是由于其机械结构的局限性与光学装调工艺的复杂性,在装调过程中将不可避免的产生光学元件相对于理想光轴的平移、倾斜等失调,破坏了光学系统关于光轴的旋转对称性。这种不对称性在光学系统的实际检测中表现为严重的彗差,象散等像差,从而影响光学系统成像质量的恶化。由于参与成像的各光学元件在光学系统中像差所起的贡献并不相同,因此,计算各片透镜的灵敏度,分析不同元件平移和倾斜对于像散的影响,确定装调精度的优先级,将提高装调的精度和效率。

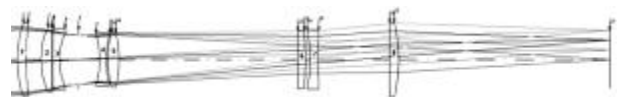


图 2 光学系统图

Fig.2 2D layout of the optical system

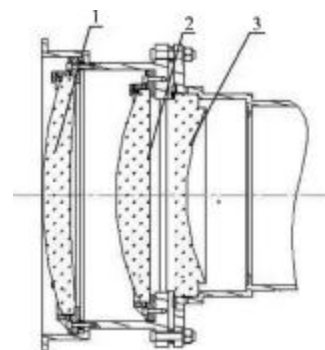


图 3 部分结构形式示意图

Fig.3 2D layout of the mechanical parts

图 2 所示的光学系统中,光学系统各片透镜的平移分别对系统中心视场的彗差和像散的影响如图 4 所示。由图 4 可知,各片透镜的平移严重影响系统彗差,是最主要的误差来源。其中透镜 4、透镜 5 的相对光轴的平移对系统像差影响均较大,其彗差敏感程度相当于其他透镜的五倍以上;对像散也有最为恶劣的影响;图 5 同样表明,透镜 4、透镜 5 相对光

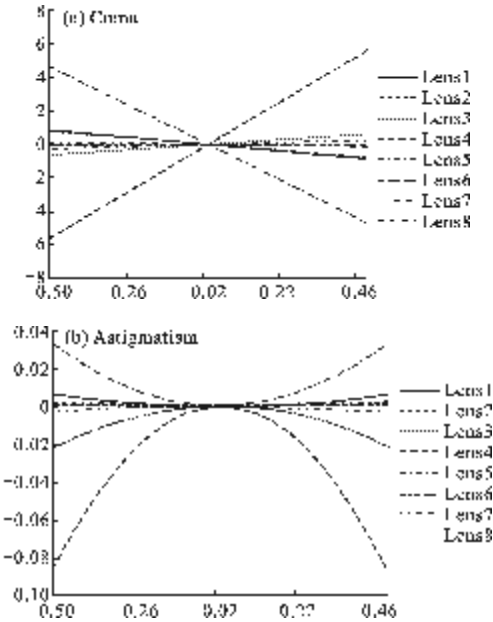


图 4 各透镜元件平移对于彗差和像散的影响

Fig.4 Coma arise and astigmatism arise from the decenter of each optical element

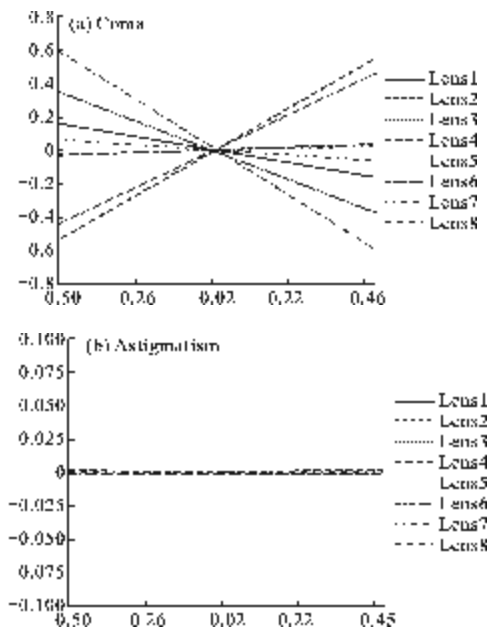


图 5 各透镜元件倾斜对于彗差和像散的影响

Fig.5 Coma arise and astigmatism arise from the tilt of each optical element

轴的倾斜也显著影响着彗差的大小。因此,从对于像差(彗差和像散)的影响程度考虑,透镜 4、透镜 5 应该作为整个镜头的基准,在实际装调过程中需严格保证了透镜 4、透镜 5 的光轴的一致性。透镜 3 是透镜 4、透镜 5 之外像差受平移和倾斜影响较大的元件之一,透镜 4 位于孔径光阑之前,具有较好的装调适应性,在局部范围内能有效的补偿由于其他元件装调过程中产生的失调误差。透镜 6、7、8 三片的平移和倾斜对于像差的贡献都较小。

球差也是影响实际装调后系统像质的因素之一。球差一般来源于球面曲率半径的偏差,元件厚度的偏差,镜间距的偏差,各个光学表面面形误差等。受制于部分光学元件参数测试的精度以及各参数之间的累积和补偿关系,系统球差难以在过程中严格控制,只有在系统装调完成后才能获得。如果采用传统的直装方式,一方面装调过程控制的难度大大增加,另一方面可能降低一次装调成功率,增加产品质量风险。考虑到镜间距对于球差有明显的补偿作用,可以通过对每一个镜间距的像差分析,选择具有明显的球差补偿特性而且对于像散和彗差不太敏感的镜间距作为补偿量,来提高装调的效率和一次成功率。图 6 示为各镜间距对于系统球差的影响。不难看出,透镜 2、3 间距,透镜 4、5 间距对于球差都有着极为剧烈的影响,同时对于彗差和像散的影响并不明显。考虑到透镜 4、5 作为光轴基准,因此,透镜 2、3 间距将作为球差的补偿量。

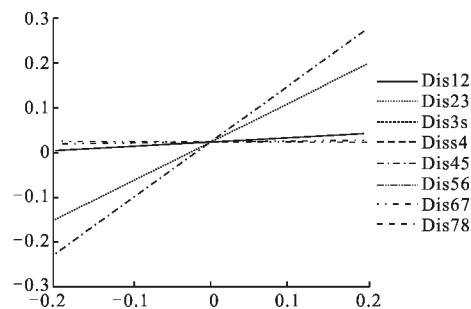


图 6 各透镜之间的距离对于球差的影响

Fig.6 Spherical arise from the offset of distance between each optical element

综上所述,利用计算机辅助装调技术,图 2 所示的透射式系统装调方案可设计为三部分:后组部分,透镜 4 与透镜 5 作为光轴基础,随后透镜 6、7、8 依照传统定心直装方法控制偏心和倾斜;补偿部分,透

镜 3 的平移和倾斜作为像散和彗差的补偿量,透镜 2、3 间距作为球差的补偿量,在后组整体翻转后进行在线调整;前组部分,透镜 1、2 单独定心完成后,再与透镜 3 及后组连接。

### 3 实例验证

根据上节所确定的装调方案,针对实际镜头的装调进行了验证。系统初装完成后,进行了像质检测,系统波像差测试干涉图如图 5 所示。此时系统存在较大的彗差和球差。将各透镜实测数据带入系统仿真分析计算,确定利用透镜 2、3 间距进行失调补偿,仿真结果表明镜间距减小 0.06 mm,能显著降低球差,透镜倾斜改变 3",能显著降低彗差。根据计算结果进行调整后的系统波像差干涉图如图 7 所示。从干涉图及数据的对比(表 1)中可以看出,彗差、球差的仿真数据与实际测试数据吻合,系统质量证明仿真精度能够指导装调,补偿调整策略有效。

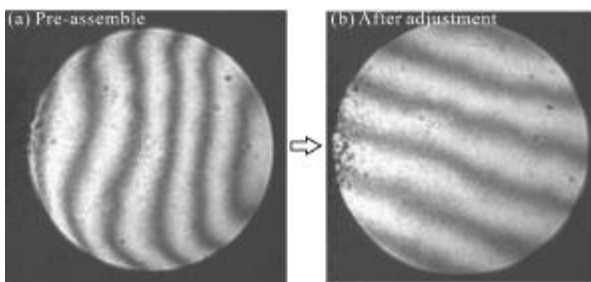


图 7 系统初装后和调整后的系统波像差干涉测试图

Fig.7 Interference map after the pre-assembly and adjustment

表 1 镜头分析、测试数据对比表

Tab.1 Comparison of the simulated misalignment and calculated result

	First assemble	Simulation data	After alignment
Wavefront error RMS	0.084	0.040	0.046
Spherical	0.104	0.034	0.04
Coma	0.036 -0.09	0.018 -0.042	0.02 -0.031

### 4 结论

文中讨论了在光学元件较多、控制复杂、失调量定位分析难度大的透射式光学系统装调中计算机辅助装校技术的应用,提出了通过对一次装调后的系统进行像差分析计算,确定补偿环节进行补偿调整的装校方案,避免了传统模式中的经验式、盲目性调整,提升了透射式系统装调质量和效率。

### 参考文献:

- [1] Yang H S, Lee Y W, Kim E D, et al. Alignment methods for Cassegrain and RC telescope with wide field of view[C]// SPIE, 2004, 5528: 334-341.
- [2] Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli, et al. Computer aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2156-2163. (in Chinese)
- [3] Wang Fuguo, Yang Hongbo, Yang Fei, et al. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 877-880. (in Chinese)
- [4] Zhang Wenjing, Liu Wenguang, Liu Zejin. Numerical simulation for computeraided precise alignment of unstable resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 516-521. (in Chinese)
- [5] Che Chichen, Li Yingcai, Fan Xuewu et al. Research on computeraided alignment based on vector aberration theory[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1631-1634. (in Chinese)
- [6] Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun, et al. Computer-aided alignment for reflective zoom systems [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1688-1692. (in Chinese)
- [7] Gong Dun, Tian Tieyin, Wang Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1754-1759. (in Chinese)
- [8] Zhao Jinyu, Wang Dexing, Li Wenjun, et al. New method of dynamic correction for the system errors of telescope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(2): 244-246. (in Chinese)
- [9] Wu Guodong. Alignment method of CCD image plane for three-Una array mapping camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2395-2398. (in Chinese)