

文章编号:1002-2082(2015)02-0277-05

小口径高精度折射式光学系统装调公差的分析与控制

栗孟娟, 廖志波, 王春雨

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘 要:采用小口径高精度折射式光学系统的对地观测遥感器对成像质量要求严格,随之对装调公差要求苛刻。传统装调公差分配完全以光学设计给定公差为标准,在实际装调过程中与精度和周期的需求产生矛盾。提出将光学设计和装调实践相结合,用全过程仿真计算进行成像质量预估,对公差进行再分配,并利用光学系统各分离误差相互间的补偿,实时调整公差。然后举例说明在某小口径高精度折射式光学系统装调过程中对公差的具体分析,并详细阐述了针对公差的再分配和补偿方法,实现对偏心误差的控制精度为 $2''$,对镜间距的控制精度为 $1\ \mu\text{m}$ 。镜头装调完成后成像性能良好,证明公差分配及控制方法的改进使装调效率显著提高。

关键词:小口径;光学遥感器;折射式光学系统;光学装调

中图分类号:TN216

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201536.0203007

Analysis and control on assemblage tolerance in small-aperture high-precision refractive optical system

Li Mengjuan, Liao Zhibo, Wang Chunyu

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China)

Abstract: High imaging quality is required in the small-aperture high-resolution space-to-ground remote sensor of refractive system, as a result the assemblage tolerance is rigorous. The assemblage tolerance distribution rooted in optics design before, however, the strict tolerance cannot be achieved in small-aperture high-resolution space remote sensor now. An improved tolerance distribution was recommended based on the combination of optic design and assembly practice. It estimated the imaging quality through the emulation of whole process, reallocated the tolerance and adjusted it by compensation real-time. The improved tolerance distribution was proved by a small-aperture camera lens assemblage. Results show that the control accuracy of eccentric error is $2''$, and that of mirror spacing is $1\ \mu\text{m}$, the imaging quality is good after camera assemblage.

Key words: small-aperture; optical remote sensor; refractive system; optical alignment

引言

采用高精度折射式光学系统的对地观测遥感器,尤其是谱段为可见光,光学系统要达到接近衍射极限的成像质量,因而装调公差要求严格。国外采用在同一台高精度中心偏测量仪上进行机械加工和系统调心,实现机械轴和光轴的高度一致性,达到装调公差。国内由于机械和光学加工能

力所限,首先将光学元件与金属框联结形成组件,经过机械加工将组件的光学基准引至结构基准,然后在中心偏测量仪上调整各组件的光轴一致性。由于折射式镜头不具备在装调过程中实时测量系统像质的条件,为降低装调风险,传统的公差控制是严格以光学设计给定公差为标准。但随着空间光学遥感器的快速发展,装调公差越来越严

收稿日期:2014-10-15; 修回日期:2014-12-15

作者简介:栗孟娟(1980—),女,河北大名,人,硕士研究生,工程师,主要从事光学装调和光学检测方面的研究。

E-mail: limengjuan_99@163.com

苛。尤其是小口径高精度折射式光学系统,其偏心误差和镜间距更加敏感,遵循以往的装调公差分配及控制方法,会经常发生对镜头组件反复装调的情况,严重降低装调效率。因此将光学设计和装调实践相结合对公差进行再分配和补偿,对保证装调质量具有重要的工程意义。

由于折射式系统镜片多,各种分离误差在装调过程中可以相互补偿,这也使得实际装调中存在实时调整公差的可能。影响光学性能的装调公差主要包括光学元件面形误差、偏心误差、镜间距误差等。经过仿真计算发现,某些透镜组件的超差对成像质量影响有限,或者其超差影响可由后续透镜组件进行补偿。另一方面,公差控制方法在小口径高精度折射式光学系统装调方面遇到瓶颈,包括偏心误差和镜间距。本文首先针对小口径高精度折射式光学系统提出对装调公差的再分配和补偿方法,并以一个 $f=270\text{ mm}$ 的光学系统为例,对装调公差的分析和控制进行了详细阐述。

1 装调公差分配原则

光学设计最初分配的装调公差,是基于各项公差对系统像质的影响权重,并参考当前的装调工艺水平进行分配,目标是保证装调后遥感器成像性能达标。但由于光学遥感器发展迅速,公差趋于苛刻,而折射式光学系统镜片多,在当前装调设备和工艺水平不断发展情况下,保证所有公差满足要求仍然是相当困难的。为提高装调效率,本文提出的装调公差分配原则如下:以光学设计给定公差为基础,根据单片透镜组件的装调难度及实际误差,用仿真计算进行成像质量预估,并利用光学系统各分离误差相互间的补偿,对公差进行再分配和补偿,实时调整公差。

2 装调公差分析及控制

以一种小口径高精度折射式光学系统遥感器装调过程为例,说明装调公差的分析和控制方法。如图1所示,光学系统为像方远心光路,谱段为 $450\text{ nm}\sim 800\text{ nm}$, $f=250\text{ mm}$,相对孔径 $1/3.5$,视场角 $2\omega=20^\circ$,奈奎斯特频率 77 lp/mm 处各视场平均 $\text{MTF}=0.65$,要求装调后 $\text{MTF}\geq 0.60$ 。光学系统公差分配如表1所示,各光学元件装配为组件后面形误差要求均为 $\text{RMS}=0.02\lambda$,镜间距公差和偏心公差在折射式光学系统公差中属于相当苛刻。

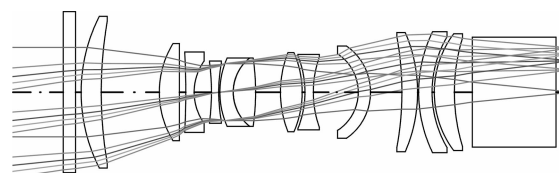


图1 光学系统示意图

Fig. 1 Diagram of optical system

表1 光学系统公差分配

Table 1 Tolerance distribution

透镜	局部光 圈 ΔN	倾斜 / $''$	平移 /mm	镜间距 公差/mm
1	0.2	5	0.008	
	0.2		0.008	± 0.01
2	0.2	5	0.004	
	0.2		0.003	± 0.01
3	0.2	4	0.003	
	0.2		0.003	± 0.005
4	0.2	4	0.005	
	0.2		0.005	± 0.005
胶合镜 5	0.2	5	0.003	
和 6	0.2		0.003	± 0.005
7	0.2	4	0.005	
	0.2		0.005	± 0.005
8	0.2	5	0.004	
	0.2		0.004	± 0.01
9	0.2	6	0.003	
	0.2		0.003	± 0.01
10	0.2	5	0.005	
	0.2		0.005	± 0.01
11	0.2	8	0.006	
	0.2		0.006	± 0.01
12	0.2	6	0.010	
	0.2		0.010	

2.1 光学元件面形误差分析与控制

光学元件加工完成后已有一定的面形误差,在组件装配过程中可能受装配应力的作用而变化。小口径透镜组件的装配方式一般是裸镜进金属框,通过弹性压圈、胶圈进行透镜轴向固定,侧面注胶,通过干涉仪监测透镜面形。光学设计要求的面形误差均为 $\text{RMS}=0.02\lambda$,但实际上各片透镜对成像质量影响差异很大,主要与透镜在系统中的位置相关。在装配过程中发现,透镜1、9和12均为弯月形镜片,弹性压圈很容易对凸面产生装配应力,造成面形误差明显增大,透镜4由于镜片薄,也容易受到装配应力,这几片透镜反复装配的结果都不理想。

为了提高装调效率,利用36项 ZERNIKE 系数来表征光学元件面形误差,进行精确仿真计算,组件装配后的透镜1、4、9、12面形误差对MTF的

影响如图 2 所示。

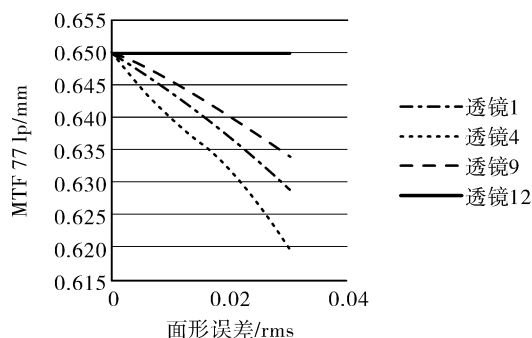


图 2 透镜面形误差对 MTF 影响

Fig. 2 Effect of surface figure error on MTF

由上图得出:透镜 4 的面形误差对 MTF 影响最明显,因此在组件装配时着重控制了透镜 4 的面形误差,使其对 MTF 影响很小。将最后控制的各光学元件面形误差代入模型计算,全谱段各视场 MTF 均值为 0.631。

2.2 光学元件偏心误差分析与控制

光学元件偏心误差控制目标是实现所有光学元件的光轴一致性,调整过程产生的平移、倾斜误差即偏心误差,所带来的非对称像是造成光学系统性能下降的最主要原因,所以调整偏心是整个镜头装调过程中最重要的环节。偏心误差测量原理如图 3 所示,偏心角秒计算式如下:

$$\alpha = \frac{d * f_{\text{HEAD}}}{2f_{\text{ACM}} * r_{\text{SAMPLE}}}$$

式中: d 为 CCD 观测到的偏心线量; f_{HEAD} 为中心偏测量仪目镜焦距; f_{ACM} 为测量仪物镜焦距; r_{SAMPLE} 为被测光学元件曲率半径。传统的装调工艺控制偏心是用单个光学表面偏心角秒为评价指标,不区分平移和倾斜误差。但是从上式可以看出,偏心角秒与光学表面曲率半径成反比,所以这样的控制方法对于小曲率半径的光学元件会遇到困难。问题本质是以偏心角秒评价不能区分平移和倾斜误差。对此在图 1 光学系统装调中引入方位误差在线分离评价方法,即测量单个光学表面偏心角秒后计算光学元件的光轴偏差,区分平移和倾斜误差,使测试过程与光学设计形成精确的对应关系,实现了对于透镜偏心误差的高精度测量。

在改进评价方法的基础上,保证各光学元件的偏心公差仍然相当困难。小口径透镜对倾斜误差特别敏感,而且装配时镜框受力变形就能造成

倾斜角度的迅速改变。针对偏心误差进行仿真计算,如口径很小的透镜 3、4、胶合镜(5、6),以及 2 个光学表面近似同心的透镜 9,计算结果如图 5、6。

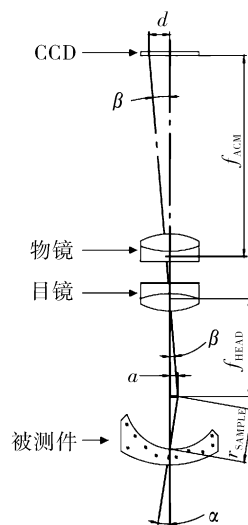


图 3 中心偏测量仪测量光路

Fig. 3 Light path of ecentric error measurement

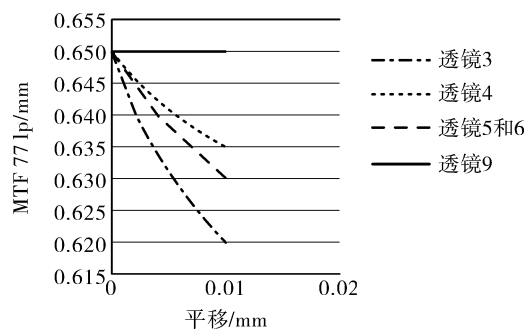


图 4 平移误差对 MTF 影响

Fig. 4 Effect of translation error on MTF

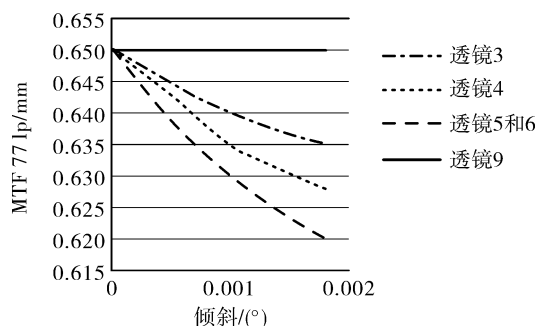


图 5 倾斜误差对 MTF 影响

Fig. 5 Effect of tilt on MTF

图 4、5 表明透镜 3、4、胶合镜的偏心对 MTF 影响明显,因此在实际装调中严格控制了这几项,并采用偏心误差相互补偿的控制方法,例如精确调整透镜 4 的偏心方位,来补偿透镜 3 的偏心造成的

像差。装调后将各透镜的偏心误差代入光学系统进行仿真计算,全谱段各视场 MTF 均值为 0.621。

2.3 光学元件镜间距误差分析与控制

镜间距超差过多将造成光学系统球差过大。本文涉及的光学系统镜间距公差只有 $\pm 0.005 \pm 0.01$ mm。由于镜间距的测量必须以偏心误差合格为前提,要实现 ± 0.005 mm 的公差也许要反复多日。针对系统中镜间距在 2 mm 以内的透镜进行仿真计算,如图 6 所示。

图 6 数据说明透镜 4、5、7、8 之间的镜间距至关重要,所以在装调时重点保证,装调后镜间距误差分别为 $+0.004$ mm 和 -0.003 mm。对其余镜间距也采取了互相补偿的方式进行控制,正负互补。将系统所有实测镜间距结合已有的面形误差、偏心误差进行仿真计算,得到全谱段各视场

MTF 均值为 0.61,对应 632.8 nm 波长的各视场波前仿真干涉图如图 7 与图 8 所示。

装调完成后用干涉仪实测各视场干涉图如下,全谱段各视场实测 MTF 均值为 0.603,与仿真结果基本一致。

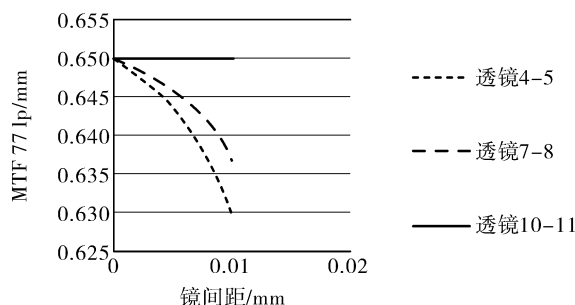


图 6 镜间距误差对 MTF 影响

Fig. 6 Effect of mirror spacing on image MTF

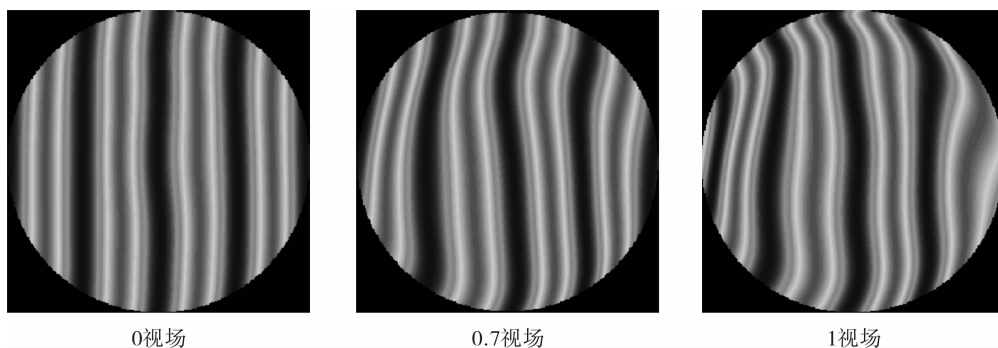


图 7 仿真干涉图

Fig. 7 Simulation of wavefront interferogram

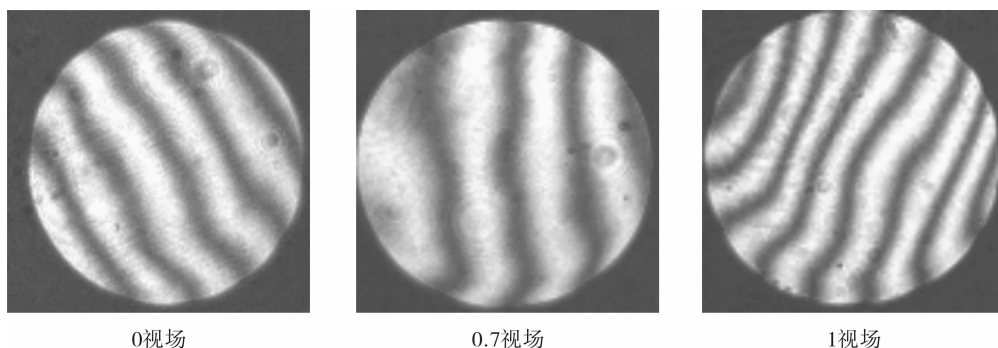


图 8 实测干涉图

Fig. 8 Tested wavefront interferogram

3 总结

本文针对传统装调公差分配及控制方法不能满足小口径高精度折射式光学系统装调精度和周期的问题,提出将光学设计和装调实践相结合,对装调公差进行再分配和补偿,然后结合实例说明

该方法在实际装调中的应用,对装调公差的分析,以及测量控制方法的改进。装调结果表明了所应用的装调分配原则和测量控制方法能够满足精度和周期的要求,并适用于其他小口径高精度折射式光学系统的装调。

参考文献:

- [1] Zeng Fushan, Chen Haiqing, Ren Wenxi. Automatic measurement of optical lens decentration[J]. Optical Instrument, 2007,29(2):12-16.
曾付山,陈海清,任温馨. 透镜组中心偏自动测量[J]. 光学仪器,2007,29(2):12-16.
- [2] Wang Zhaoxu. Principle and application of the measurement of the centering errors in optical system[J]. Optical Technology,1983(3):67-69.
王肇勋. 光学系统偏心测量原理及应用[J]. 光学技术,1998(3):67-69.
- [3] He Bo. Development of the software of the optical center-deflection-measure instrument [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2004,25(1):45-49.
贺勃. 光学中心偏测量仪软件研制[J]. 航天返回与遥感,2004,25(1):45-49.
- [4] Ming Ming, Wang Jianli, Zhang Jingxu, et al. Error budget and analysis for optical system in large telescope[J]. Optics and Precision Engineering,2009,17(1):104-107.
明名,王建立,张景旭,等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J]. 光学精密工程,2009,17(1):104-107.
- [5] Lin Wumei. Study on computer aided assembling mechanism of optical system[J]. Opto Electronic Engineering,1999,26(12):49-52.
林妩媚. 光学系统计算机辅助装调(CAA)机理的研究[J]. 光电工程,1999,26(12):49-52.
- [6] Guo Xiarui, Liao Zhibo, Wang Chunyu, et al. Aberration and alignment quality investigation of space transmission optical system with centering error of optical axes [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012,41(2):436-441.
郭夏锐,廖志波,王春雨,等. 光轴一致性误差对空间透射式系统像差和质量的影响[J]. 红外与激光工程,2012,41(2):436-441.
- [7] Guo Xiarui, Wang Chunyu, Liao Zhibo, et al. Misalignment and assemblage stress analysis in space transmission optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012,41(4):947-951.
郭夏锐,王春雨. 廖志波,等. 高精度透射式空间光学系统装调误差分析与动态控制[J]. 红外与激光工程,2012,41(4):947-951.
- [8] Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang, et al. Aberration properties of the decentered and tilted optical systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(11):1658-1662.
杨新军,王肇圻,母国光,等. 偏心 and 倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报,2005,34(11):1658-1662.
- [9] Yang Bingxin. Characteristic and specifications of IKONOS and QuickBird2 satellite camera-some points for developing such like satellite camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2002,23(4):10-12.
杨秉新. 美国 IKONOS 和 QuickBird2 卫星相机的主要性能和特点分析及看法 [J]. 航天返回与遥感, 2002,23(4):10-12.
- [10] Fu Ruimin, Yue Liqing. Present state and perspectives of alignment technology for space optical remote sensor [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011(3):30-35.
伏瑞敏,岳丽清. 航天光学传感器光学装调技术现状与展望[J]. 航天返回与遥感,2011(3):30-35.