

文章编号: 1005-5630(2015)05-0414-05

高分辨率星载光学系统装调过程的 偏心误差分析

王 芬, 王 敏, 林 峰, 郭巧双

(福建师范大学 光电与信息工程学院 医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

摘要: 针对影响光学系统成像质量的装调误差, 分析了偏心误差对高分辨率光学系统成像的影响。基于一款自主设计的接近衍射极限的高分辨率星载相机光学系统, 利用 Zemax 光学软件分析光学装调过程中偏心误差对光学传递函数的影响, 得出光学系统中各个分离元件对成像质量影响的权重, 为光学系统的装调方案设计和实施提供了依据, 实现了该光学系统 2 500 万像素高分辨率成像。这种误差分析方法实现了对光学系统装调过程的有效控制, 提高了光学装调的效率。

关键词: 光学系统; 高分辨率; 偏心误差; 装调

中图分类号: TH 74 **文献标志码:** A **doi:** 10. 3969/j. issn. 1005-5630. 2015. 05. 008

Analysis of the eccentric error in the high-resolution spaceborne optical system

WANG Fen, WANG Min, LIN Feng, GUO Qiaoshuang

(Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education),
College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The alignment errors affect the imaging quality of optical system. We analyze the influence of eccentric error in the high-resolution optical imaging system. Based on a self-designed high-resolution spaceborne optical system which is closed to the diffraction limitation, we use the software Zemax to analyze how the decenter and tilt during its alignment process affect the MTF. At the same time, we know that the weight of separate element affects the optical system. It can provide the basis for the design and implementation of alignment, and achieve the high-resolution imaging of 25 million pixels. This error analysis method can control the alignment effectively and improve the efficiency of system alignment.

Keywords: optical system; high-resolution; eccentric error; alignment

引 言

随着现代航天技术的快速发展,对探测目标的分辨率要求也越来越高。为了能够探测目标的微小细

收稿日期: 2015-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61275216)

作者简介: 王 芬(1990—),女,硕士研究生,主要从事光学设计和光学检测方面的研究。E-mail: fenwang123@163.com

通信作者: 王 敏(1963—),女,教授级高级工程师,主要从事精密光学仪器的研究开发。E-mail: mawang@fjnu.edu.cn

节,得到更清晰的图像,高分辨率星载光学系统的研制成为了该领域研究者的重要课题^[1]。目前星载相机光学系统正向着超高分辨率、宽光谱、多功能方向发展。光学系统设计、光学加工技术、光学检测方法以及装配工艺直接影响着光学系统的成像质量,对于接近衍射极限的光学系统,其最终的成像质量更多取决于光学加工误差、检测方法和装配技术。考虑到在短时间内提高光学加工工艺和光学检测精度的难度,可以将提高光学成像质量的重心放在光学系统的装配上,即利用现有加工工艺生产光学元件,并对其检测获得单元误差,然后通过有效的装配技术来获得高分辨率成像光学系统。光学系统的装配过程中主要存在光学元件的镜间距误差和偏心误差引起的光轴一致性误差^[2-3]。镜间距误差通过调整光学元件间的隔圈厚度可进行校正,而光学元件的偏心误差不仅会导致光轴一致性误差的出现,而且也会引起有效镜间距的偏差,因此在系统装调过程中我们主要调节元件的偏心误差。一般偏心误差对中、低分辨率的镜头影响不大,而在高分辨率光学系统中,偏心误差就成为主要问题^[4]。本文基于一款自主设计的接近衍射极限的高分辨率星载相机光学系统,利用 Zemax 光学软件分析光学装调过程中偏心误差对光学传递函数的影响,得出各分离光学元件引起传递函数下降的影响权重,为光学系统的装调方案设计和实施提供参考。

1 偏心误差与系统像差的关系

为了满足光学系统成像质量的要求,必须保证该光学系统光轴的一致性^[5]。但是在装调过程中,由于机械结构的误差与光学工艺的复杂性,实际光学系统中的各个光学元件将不可避免地产生偏心误差。偏心误差包括位置偏心(即偏心)和角度偏心(即倾斜),如图 1 所示。偏心是指光学元件的光轴与系统的基准轴平行但有一个偏移量,倾斜是指光学元件的光轴与系统的基准轴不平行即有一个倾角^[6]。实际光学系统装调过程中的偏心误差为两者的叠加。

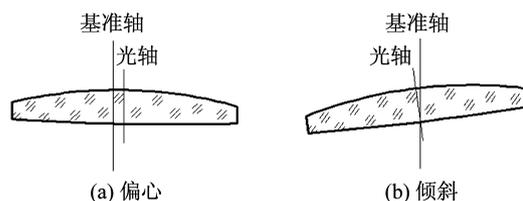


图 1 偏心和倾斜

Fig. 1 Decenter and tilt

偏心误差的存在破坏了光学系统光轴的一致性,从而导致成像质量的降低^[7]。文献^[8]假定并证明了由于倾斜和偏心方向的任意性,使得具有倾斜和偏心的光学系统不再具有对称轴或对称面。杨新军等^[9],樊学武等^[10]根据矢量像差理论推导得到的共轴旋转对称光学系统三阶波前像差赛德尔多项式的矢量表示形式如下:

$$W = \sum W_i = \sum W_{040i} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})^2 + \sum W_{131i} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_i) \cdot \mathbf{r}] (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) + \sum W_{222i} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_i) \cdot \mathbf{r}]^2 + \sum W_{220i} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_i) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_i)] (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) + \sum W_{311i} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_i) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_i)] [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_i) \cdot \mathbf{r}] \quad (1)$$

式中: \mathbf{H} 为视场矢量; \mathbf{r} 为光瞳向量; W_i 为第*i*面实际波前与球面参考波前在出瞳位置的光程差; W 下标的数值分别为 \mathbf{H} 、 \mathbf{r} 和 $\cos\varphi$ 的幂指数(φ 为出瞳处的孔径角); $\boldsymbol{\sigma}_i$ 为像差场相对其中心的偏移量。由式(1)可见,球差与像场无关,即系统中光学元件的倾斜和偏心对球差没有影响;虽然畸变与像场有关,但畸变并不影响成像清晰度。因此偏心误差主要是引起系统的像散、场曲和彗差的改变,从而导致光学传递函数 MTF 的下降。

2 系统装调偏心误差分析

2.1 光学系统

自主设计的接近衍射极限的高分辨率星载相机光学系统如图 2 所示。该光学系统工作波长 450~800 nm,中长焦, F 数 4,视场角 $2\omega = 10.4^\circ$,MTF 轴上点要求 110 lp/mm 处大于 0.35,0.6 视场要求 110 lp/mm 处大于 0.25,设计得到的 MTF 曲线如图 3 所示。

由图 2 可见,该光学系统镜片数量较多且排列紧密,同时成像质量要求高,偏心误差对镜头分辨率影响大,因此装配非常困难。表 1 为光学镜片的加工公差值,给定的公差值是现有光学加工工艺可以达到

的精度。根据镜片的公差值,通过光学软件仿真得出装配过程中不同光学元件的偏心误差对系统的影响情况。对影响大的元件在装配过程中进行重点控制,实现了系统 2 500 万像素的高分辨率成像。

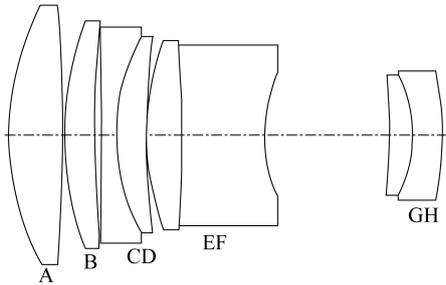


图 2 光学系统图

Fig. 2 Layout of optical system

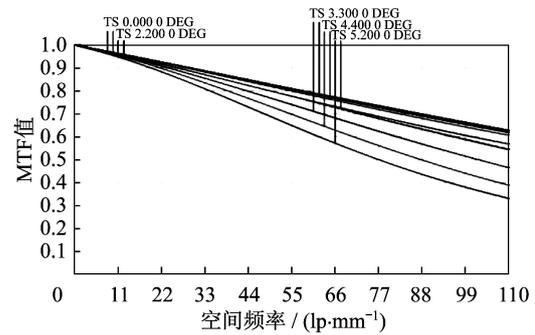


图 3 MTF 设计值

Fig. 3 Designed MTF

2.2 各分离元件偏心误差对系统的影响

根据现有光学工艺加工出来的光学镜片和光学系统装调的实际情况,在 Zemax 中分别模拟光学元件相对于光轴的偏心和倾斜,得到各个光学元件对光学传递函数 MTF 下降的影响权重,仿真结果如图 4、图 5 所示。

图 4 所示为光学系统各光学元件相对于基准轴偏移 0.015 mm 时对 MTF 下降影响的柱状图,由图可知,对于 X 和 Y 方向偏心,镜片 A 对像质影响最大,镜片 B 和胶合组 CD 的偏心影响也不容忽视。图 5 所示为光学系统各光学元件相对于光轴倾斜 0.015°即 54"时对 MTF 下降影响的柱状图,由图可知,胶合组 CD 的倾斜对像质影响最大,镜片 B 次之,而胶合组 EF 和 GH 的倾斜误差对像质几乎没有影响。综合考虑偏心和倾斜的影响,可以发现胶合组 CD 的偏心误差对像质最为敏感,在光学系统的装调过程中应该重点控制,其次为镜片 B 和镜片 A。

表 1 光学镜片加工公差值

Tab. 1 Tolerance of lens

公差类型	面形公差	厚度公差/mm	偏心公差/mm	局部面形公差
公差值	3	0.03	0.01	0.4

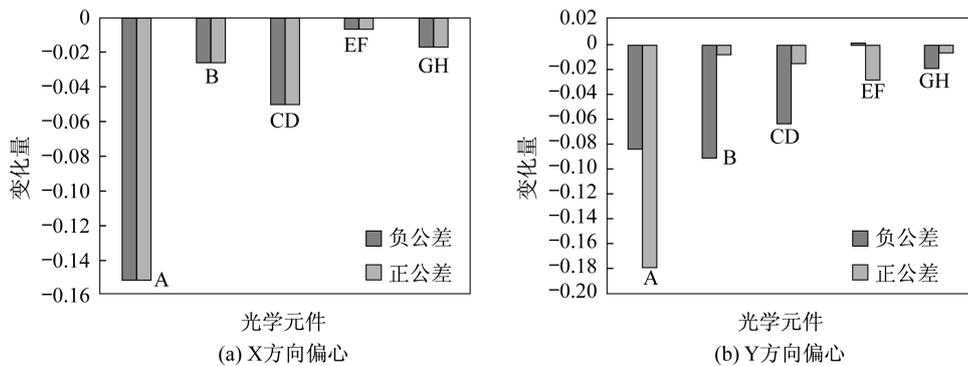


图 4 X 和 Y 方向偏心引起的 MTF 下降

Fig. 4 Decrease of MTF caused by X and Y decenter

2.3 装调偏心误差对 MTF 的影响

图 6 和图 7 所示分别为光学元件相对于基准轴不同的偏心量和倾斜量对 MTF 的影响,横坐标分别为单个元件的偏心和倾斜量,纵坐标为 110 lp/mm 处系统的 MTF 平均值。显而易见,随着每个元件相对于基准轴的偏心和倾斜量的增加,系统 MTF 下降,且不同元件对系统 MTF 的影响不同。系统成像质量要求在 0.6 视场 110 lp/mm 处 MTF 大于 0.25,而偏心误差主要影响的是边缘视场的成像质量,则 0.6 视场的 MTF 值可近似系统的平均 MTF 值。因此根据图 6 和图 7 的曲线可以判断装调过程中镜片 A 的偏心和胶合组 CD 的倾斜需分别控制在 0.03 mm 和 0.018°以内。系统实际装调过程中的偏心误差是偏

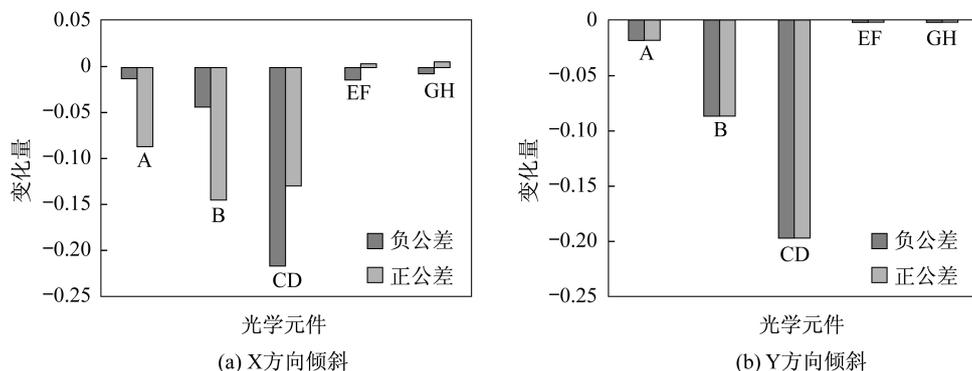


图 5 X 和 Y 方向倾斜引起的 MTF 下降

Fig. 5 Decrease of MTF caused by X and Y tilt

心和倾斜的综合作用,利用偏心和倾斜的关系,综合图 6 和图 7,计算出对光学系统最敏感的镜片 A、B、CD 的装配偏心误差公差值分别为 $4.87'$ 、 $3.21'$ 、 $2.68'$,可见镜片 CD 最为敏感,需要重点控制。在系统装调过程中,可以利用偏心测量仪对元件的偏心误差进行测量,定量控制装调过程中的元件偏心误差,实现光学系统的高效装调。

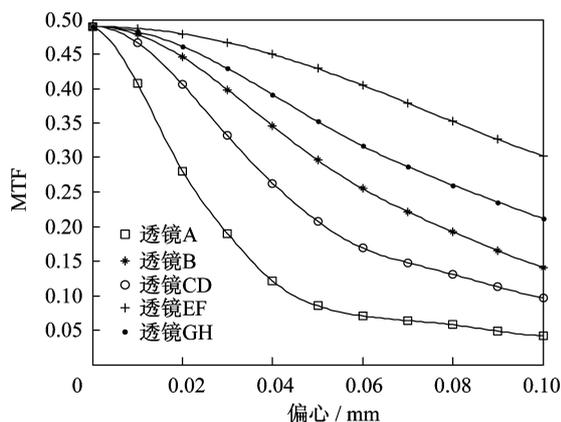


图 6 偏心对 MTF 的影响

Fig. 6 The influence of decenter on MTF

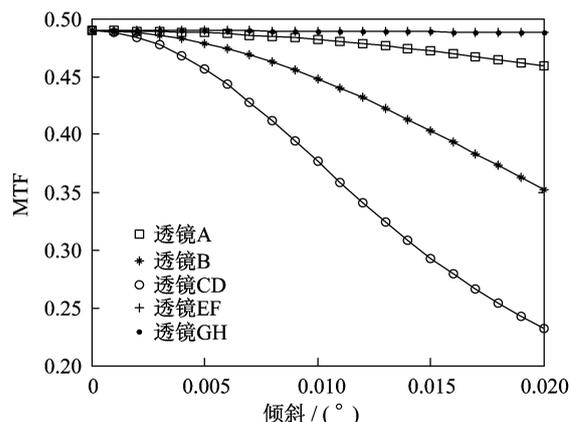


图 7 倾斜对 MTF 的影响

Fig. 7 The influence of tilt on MTF

2.4 装调过程与结果

利用现有光学工艺加工光学镜片,在装配前对每个镜片进行面形、厚度和偏心检测并记录数据。根据设计给定的公差值筛选出合格的镜片并进行分组、优化匹配,利用偏心测量仪对系统进行逐片偏心校正,同时控制光学系统镜间距离。装配完成后利用星点板在平行光管上定性分析像质,当得到好的星点像时认为系统装调成功,最后再利用光学传递函数测量仪检测系统的 MTF 值。

以 X1 号光学系统为例,X1 号光学系统各个镜片的面形偏差、厚度误差和偏心误差均小于给定的公差值。利用偏心测量仪测量出系统各镜片的装调偏心误差,测量值如表 2 所示。对像质影响最为敏感的镜片 CD 的装调偏心误差调节至公差值范围内,其他镜片的装调偏心误差也远远小于公差值。在 1 300 mm 的光具座上利用星点板看到的星点像中心亮且圆,周围有一个低亮度仅有约 1/8 圆大小缺口的环,说明此时装调的光学同心度校正得较好。再用 3 号分辨率板看到 22 组四个方向的条纹清晰,最后利用光学传递函数测量仪测量系统的 MTF,得到的 MTF 值曲线如图 8 所示,0 视场 110 lp/mm 处的子午和弧矢 MTF 均达到 0.35,0.6 视场 110 lp/mm 处的子午和弧矢 MTF 也达到了 0.3,整体像质得到有效提高,满足用户要求。

表 2 元件的装调偏心误差

Tab. 2 Component's eccentric error in the alignment

透镜组	透镜 A	透镜 B	透镜 CD	透镜 EF	透镜 GH
偏心误差/($'$)	2.62	2.94	2.64	1.25	0.23

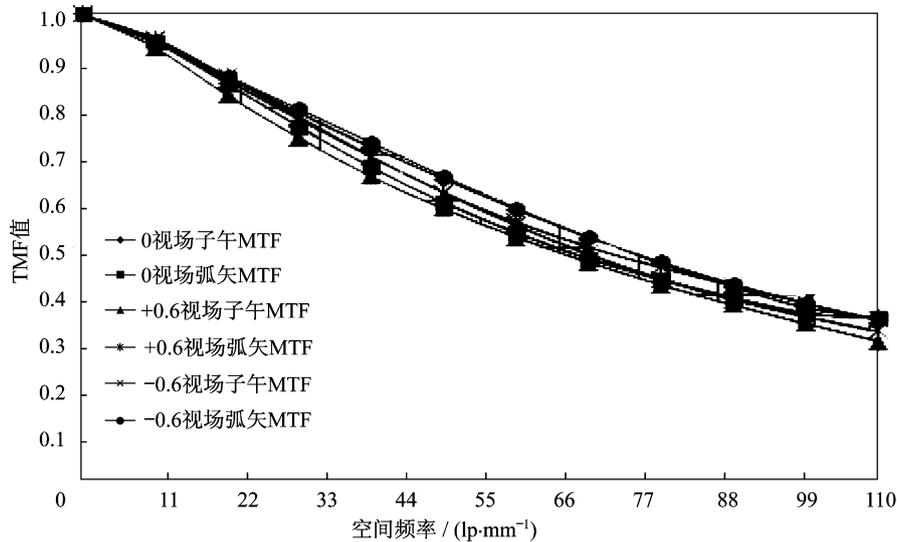


图 8 装调后的 MTF

Fig. 8 MTF after alignment

3 结 论

本文基于一款高分辨率星载相机光学系统,通过 Zemax 光学软件模拟分析和实际装调实践,说明了光学系统的偏心误差引起的光轴一致性误差是影响高分辨率光学系统成像质量的一个重要因素。利用软件模拟分析装调过程中各个光学元件的偏心误差对光学传递函数下降的影响情况,分析不同大小的偏心误差对系统光学传递函数的影响,确定装调过程中偏心误差的公差值,定量地指导光学系统装调,实现了系统 2 500 万像素高分辨率成像。与传统的单纯靠装调人员经验的方法相比,这种误差分析方法能够为光学系统的装调方案设计和实施提供依据,实现装调过程的定量控制,缩短了装调周期,有效提高了光学装调的效率。

参考文献:

- [1] 詹明媚. 超高分辨率星载光学系统装调检测[D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 1-5.
- [2] 廖志波, 王春雨, 栗孟娟, 等. 透射式光学系统计算机辅助装校技术初步研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2453-2456.
- [3] 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.
- [4] 强西林. 光学系统偏心公差计算及程序[J]. 西安工业学院学报, 1984(2): 109-113.
- [5] 徐德衍, 王青, 高志山, 等. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [7] 耿丽红, 范天泉. 高精度光学中心偏测量仪主要技术指标的检测[J]. 光学仪器, 1998, 20(2): 8-12.
- [8] 吕保斌. 大口径长焦距平行光管光学系统设计[D]. 西安: 中国科学院研究生院, 2009: 17-22.
- [9] 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.
- [10] 樊学武, 陈荣利, 马臻, 等. 偏心 and 倾斜光学系统初级象差理论的研究[J]. 光子学报, 2004, 33(4): 494-496.

(编辑: 刘铁英)