

失调三反消像散光学系统像差特性

庞志海^{1,2}, 樊学武¹, 陈钦芳¹, 马 臻¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学研究室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 文中以矢量波像差理论为基础, 对 TMA 光学系统的失调像差特性进行分析, 通过分析发现失调 TMA 系统的初级球差在全视场内为常量, 彗差在全视场内的方向与量值均为常量, 由失调引入的像散表现为失对称性、像散值与视场成线性, 其零点位于中心视场。在校正失调产生彗差时, TMA 系统像散零点位于轴上视场, 像差接近于零, 而边缘视场的像散依然较大, 因此在 TMA 系统的装调过程中, 需要测量多个视场的波像差。在同样情况下若轴上视场测量到像散, 则是由于主镜的面形误差导致而非系统失调引起。利用 CODE V 对失调 TMA 系统的失调像差分布进行仿真, 结果表明, 利用矢量波像差理论可以对失调 TMA 系统的像差进行定性分析, 以提高 TMA 系统的装调效率。

关键词: 矢量波像差; 光学装调; 失调量; 像差; 三反消像散光学系统

中图分类号: TH74; TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0653-05

Misalignment induced aberration characteristic of TMA optical system

Pang Zhihai^{1,2}, Fan Xuewu¹, Chen Qinfang¹, Ma Zhen¹

- (1. Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the vector wavefront aberration theory, the misalignment induced aberration's characteristic of TMA optical system was analysed in this paper. It is shown that a misaligned TMA has three residual 3rd aberrations. The 3rd order spherical aberration that is constant over the field and the 3rd order coma is a constant in magnitude and orientation over the field. Moreover, the 3rd order astigmatism is field-asymmetric in orientation and increases linearly with the field, and the location zero for the field-asymmetric, field linear astigmatism always reside at the center of the field of view. It has been demonstrated that a TMA under assembly is only measured to have perfect performance on-axis which is not aligned in any significant way, so the measurements of multiple field points for the TMA are required in the process of alignment. Under condition of remove axial coma, if astigmatism is measured on-axis, which is caused by the primary mirror astigmatic figure error but not the misalignment.

Key word: vector wavefront aberration; optical assembly; misalignment; aberration; three-mirror anastigmatic

收稿日期: 2012-07-13; 修订日期: 2012-08-17

基金项目: 国家“863”计划(Y112G81800); 青年科学与基金(Y111B6150Z)

作者简介: 庞志海(1985-), 男, 博士生, 主要从事光学系统检测与装调等方面的研究。Email: uestc_pzh@126.com

导师简介: 樊学武(1972-), 男, 博士, 主要从事光学系统设计、光学检测装调等方面的研究。

0 引言

三反消像散^[1-3](TMA)光学系统具有高分辨率、大视场、宽谱段、易于实现轻量化等优点,被广泛地应用于空间对地观测中。TMA 光学系统的最终成像性能不仅受系统设计时的残余像差影响,还受系统制造和装调水平等因素的制约。在光学系统的装调过程中,失调(偏心、倾斜等)使光学系统失去了旋转对称性,此时系统的像差特性不能采用传统的共轴光学理论来分析。传统的系统装调是以轴上视场是否引入彗差作为判断系统失调的依据,该方法不能对失调系统的像差特性做出分析,而且视场单一,不能保证全视场的成像质量,因此,必须引入计算机辅助装调技术来指导此类光学系统的装调。计算机辅助装调技术主要采用灵敏度矩阵法^[4-6]来指导光学系统的装调过程,灵敏度矩阵法的基础是假设光学系统的失调量变化和像差变化在很小的范围内是线性关系,仅从数值分析的角度来求解出光学系统的失调量。利用灵敏度矩阵不能对 TMA 光学的失调像差特性进行分析。且当系统的失调量较大时,计算得出的失调量误差很大,对系统的装调无指导作用。

文中以矢量波像差理论为基础,对 TMA 系统存在失调时的初级像差(球差、彗差、像散)特性进行分析,阐述在装调过程中不能将轴上视场零像差作为系统完成装调判据的原因,并对 TMA 系统主镜存在面形误差时的像差特性进行分析,最终利用 CODE V 光学设计软件对失调系统的像差进行仿真分析。仿真结果表明,对于 TMA 系统,失调不会产生新的像差,失调系统的像差依然由球差、彗差、像散组成,但是系统像差的分布将会改变。

1 TMA 失调系统的矢量波像差

理想轴对称光学系统的初级矢量波像差^[7-10]表达式如下:

$$W = \sum_j W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j W_{131j} (\vec{H} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} W_{222j} (\vec{H} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j W_{220j} (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \sum_j W_{311j} (\vec{H} \cdot \vec{H}) (\vec{H} \cdot \vec{\rho}) \quad (1)$$

式中: \vec{H} 和 $\vec{\rho}$ 为视场向量和光瞳向量; j 为光学系统中

光学元件的表面数;各项系数分别代表系统的球差、彗差、像散、场曲和畸变。在系统存在失调时引入向量 $\vec{\sigma}_j$ 来表示光学系统各表面的像差中心与理想状态时的偏离量, \vec{H}_{A_j} 表示失调光学系统的视场向量如图1所示。

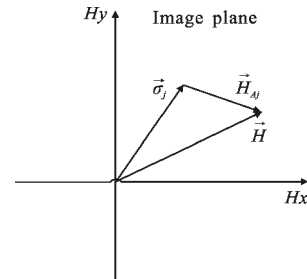


图 1 视场向量示意图

Fig.1 Representation of the effective field vector

仅考虑球差、彗差、像散,则失调 TMA 系统的矢量波像差表达式如下($\vec{H}_{A_j} = \vec{H} - \vec{\sigma}_j$):

$$W = \sum_j W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j W_{131j} (\vec{H}_{A_j} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} W_{222j} (\vec{H}_{A_j} \cdot \vec{\rho})^2 = \sum_j W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_j W_{131j} ((\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} ((\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho})^2 \quad (2)$$

由上式可知对于 TMA 系统的初级像差来说,失调不会产生新的像差,系统像差依然由球差、彗差、像散组成,失调系统的像差中心相对于理想系统有所偏移($\sum \vec{\sigma}_j$,系统状态一定时为常量)。上式中第一项 $\sum_j W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2$ 代表球差;第二项 $\sum_j W_{131j} (\vec{H}_{A_j} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})$ 代表彗差,失调系统的彗差展开可写成如下形式:

$$W = [((\sum_j W_{131j} \vec{H}) - (\sum_j W_{131j} \vec{\sigma}_j)) \cdot \vec{\rho}] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (3)$$

式中:第一项为理想轴对称 TMA 系统的彗差,在设计时 TMA 系统已经校正彗差,因此式中第一项为零,即 $\sum_j W_{131j} \vec{H} = 0$,且设 $\vec{A}_{131} = \sum_j W_{131j} \vec{\sigma}_j$ 。则失调 TMA 系统的彗差表达式可简化为:

$$W = -(\vec{A}_{131} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) \quad (4)$$

式中:第三项 $\frac{1}{2} \sum_j W_{222j} ((\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho})^2$ 代表像散,对于失调 TMA 系统的像散展开可得:

$$W = \frac{1}{2} (\sum_j W_{222j} \vec{H}^2 - 2\vec{H} \cdot (\sum_j W_{222j} \vec{\sigma}_j) + \sum_j W_{222j} \vec{\sigma}_j^2) \cdot \vec{\rho}^2 \quad (5)$$

上式中的向量运算法则参考文献 [7]。对于理想的轴对称 TMA 系统,在设计时已校正像散。因此公式(5)中第一项为零,即 $\sum_j W_{222j} \vec{H}^2 = 0$,设 $\vec{A}_{222} = \sum_j W_{222j}$

$\vec{\sigma}_j, \vec{B}_{222}^2 = \sum_j W_{222j} \vec{\sigma}_j^2$ 。则失调 TMA 系统的像散表达式可简写为:

$$W = \frac{1}{2} (-2\vec{H}\vec{A}_{222} + \vec{B}_{222}^2) \cdot \vec{\rho}^2 \quad (6)$$

因此, 可将失调 TMA 系统的矢量波像差表达式(2)简化为:

$$W = \sum_j W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 - (\vec{A}_{131} \cdot \vec{\rho}) (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \frac{1}{2} (-2\vec{H}\vec{A}_{222} + \vec{B}_{222}^2) \cdot \vec{\rho}^2 \quad (7)$$

因此, 在 TMA 系统存在失调时: (1) 不会产生新的像差, 系统像差依然由球差、彗差、像散组成; (2) 球差主要是由各光学元件间的间隔误差引起的^[11], 且与视场 \vec{H} 无关, 且在全视场内为常数。因此失调 TMA 系统的球差项 (W_{040}) 表达式与理想系统相同; (3) 彗差在整个视场 \vec{H} 内为方向相同的常数向量; (4) 失调 TMA 系统的像散在视场内主要由两部分组成: 第一部分 (\vec{A}_{222}) 与视场 \vec{H} 成线性关系, 第二部分 (\vec{B}_{222}^2) 在视场 \vec{H} 内为常数。参考文献 [12-13] 指出 \vec{B}_{222}^2 主要是由主镜面形误差引起的, 由于失调引起的 \vec{B}_{222}^2 可以忽略不计。因此, 失调 TMA 系统的像散项主要为与视场 \vec{H} 成线性关系, 且当视场 \vec{H} 为零时像散值为零, 即像散的零点位于轴上视场。

2 TMA 光学系统失调像差特性验证

如图 2 所示, 利用 TMA 光学系统对失调像差特性进行分析, 光学系统参数如表 1 所示。

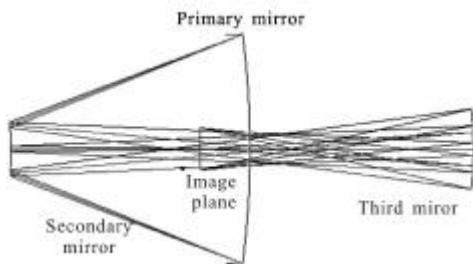


图 2 TMA 系统示意图

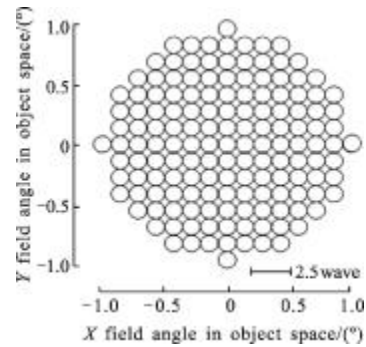
Fig.2 Schematic layout of TMA

表 1 TMA 光学参数

Tab.1 Parameter of TMA

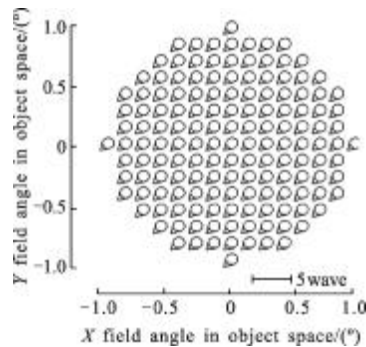
Surface	R	d	K
Primary mirror (STOP)	-2 095.41	-829.39	-0.960 4
Secondary mirror	-503.95	1 605.35	-2.189 6
Third mirror	-667.40	-948.35	-0.488 9

在 TMA 系统的装调过程中, 主镜由于口径较大不易调节, 将主镜作为系统装调的参考面。任意给定次镜、三镜的失调量, 利用 CODE V 的像差全视场分布选项分别对失调 TMA 系统的球差、彗差、像散在视场内的量值、方向进行显示, 如图 3 所示(对视场进行了归一化处理)。



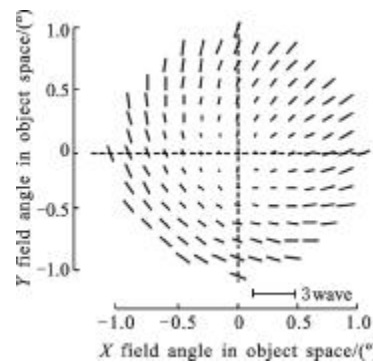
(a) 失调产生的球差在全视场内为常量

(a) 3rd order spherical aberration that is constant over field



(b) 失调产生的彗差在全视场内的量值与方向均为常量

(b) 3rd order coma that is constant over field



(c) 失调产生的像散值随视场线性增加且零点位于中心

(c) 3rd order astigmatism that is field-asymmetric and field-linear

图 3 失调 TMA 系统像差全视场显示

Fig.3 Full field display of the dominant aberrations of a misaligned TMA

图 3 分别为 TMA 系统存在失调情况下的球差、

彗差、像散在全视场内的分布形式。图 3(a)中,失调系统产生的球差在全视场内为常量;图 3(b)中,失调系统产生的彗差值为常量且彗差的方向不变;图 3(c)中,失调系统产生的像散值随着视场逐渐线性递增,在视场不同位置像散方向不同,像散值的零点位于轴上视场。与公式(7)的理论推导相符合,验证了用矢量波像差理论来描述失调 TMA 系统像差特性的正确性。

3 TMA 系统的装调特性分析

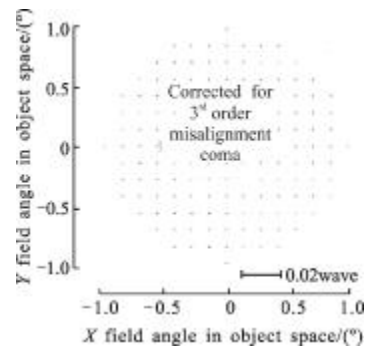
球差是由于各光学元件的间隔误差引起的,彗差、像散主要是由于光学元件的偏心与倾斜引起的。轴上彗差是光学系统存在失调的一个重要标志^[9]。通过文中分析可知对于 TMA 系统来说,除轴上彗差外,另一个失调的标志是失对称、与视场成线性关系的像散。如果调节 TMA 系统中某光学元件的偏心或倾斜来校正失调 TMA 系统的常数项彗差,将会使得失调光学系统的轴上没有像差(轴上的像散为零),但边缘视场像散较大。因此,当失调 TMA 系统的常数项彗差由于调整而得到校正以后,失调 TMA 系统的像差如公式(7)所示,图 4 为校正了失调彗差后的像差全视场显示。由公式(6)可知视场内像散的零点表达式为:

$$\vec{H} = \vec{B}_{222}^2 / 2\vec{A}_{222} \quad (8)$$

对于校正了失调彗差的 TMA 系统,失调产生的 \vec{B}_{222}^2 值近似为零,则视场内的像散零点向量 \vec{H} 为零,即像散的零点位于轴上视场(图 4(b))。系统的轴上视场波像差近似于零,但是系统边缘视场的像散依然很大,TMA 系统边缘视场的像质远远达不到要求。因此,在 TMA 光学系统的装调过程中,在校正了失调彗差的情况下仅依靠轴上视场的波像差不能保证系统的装调质量,需要测量多个视场的波像差。

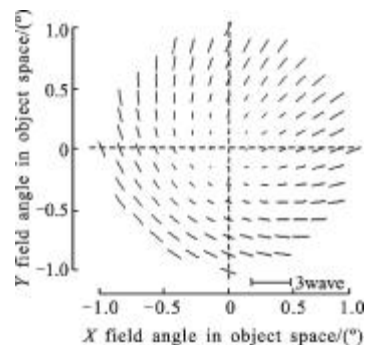
在大口径的 TMA 光学系统装调过程中,主镜口径最大,由于装夹应力、自重变形等因素会使得主镜面形发生变化,产生像散和彗差,导致在全视场内引入常量的彗差和像散,由文中分析可知 TMA 系统失调时产生的彗差在视场内为常量。因此,如果主镜装夹引入的小量的彗差,可以通过调整其他光学元件的偏心、偏摆对其进行补偿。主镜面形误差而引入的像散为常量,使得公式(8)中的 \vec{B}_{222}^2 不再近似为零,因

此由公式(8)可知视场内的像散零点向量 \vec{H} 不再位于轴上,而轴上点的像散近似等于主镜的面形误差。由于 TMA 系统失调时的像散与视场成线性关系,而主镜面形误差引入的像散在整个视场内为常量,不能相互补偿。因此不能通过调节光学元件的办法来补偿面形误差引入的像散,需要对主镜重新进行加工或装配。



(a)校正后的彗差

(a) 3rd coma after corrected



(b) 像散在轴上视场为零,随着视场增加线性增加

(b) 3rd astigmatism that is field-asymmetric and field-linear

图 4 校正了失调彗差情况下的 TMA 系统像差示意图

Fig.4 Full field display of the dominant misalignment aberration of TMA

4 结论

文中以矢量波像差理论为基础,经理论推导得出了 TMA 光学系统的失调像差特性:系统存在失调时不会产生新的像差,系统像差依然由球差、彗差、像散组成,失调仅仅改变系统的像差分布;由于失调而产生的球差在全视场内为常数;失调产生的彗差在全视场内的方向、量值为常数;不同于球差与彗差,失调产生的像散主要表现为视场失对称和量值与视场成线性关系,且像散的零点位于轴上(中心视

场)。因此在 TMA 系统的装调过程中,在校正了轴上彗差的情况下仅依靠轴上点的波像差不能作为系统装调完成的依据,而应该测量多个视场的波像差保证系统的装调质量。与主镜微小的面形彗差可以通过调整光学元件来补偿不同,在 TMA 系统装调过程中,若测得轴上视场的像散不为零,是由于 TMA 系统的主镜面形误差引起的,该像散不能通过调整光学元件来补偿。对于理解失调 TMA 系统的像差特性和提高 TMA 系统的装调效率具有重大的参考意义。

参考文献:

- [1] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese)
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 278-280.
- [2] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 706-709.
- [3] Li Huan, Xiang Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 500-504. (in Chinese)
李欢, 向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 500-504.
- [4] Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei. Study on computer-aided alignment method[C]//SPIE, 2005, 5638: 674-681.
- [5] Kim Yunjong, Yang Hosoon, Kim Sugwhan, et al. Alignment of off-axis optical system with multi mirrors using derivative of zernike polynomial coefficient [C]//SPIE, 2009, 7433: 74330C1-74330C8.
- [6] Zhang Bin, Hang Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 54-58. (in Chinese)
张斌, 韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究[J]. *光学学报*, 2001, 21(1): 54-58.
- [7] Thompson K P. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry [J]. *Opt Soc Am A*, 2005, 22(7): 1389-1401.
- [8] Rogers J R. Techniques and tools for obtaining symmetrical performance from tilted-component systems [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(7): 1776-1787.
- [9] Shark R V, Thompson K P. Influence of alignment error of a telescope system on its aberration field [C]//SPIE, 1980, 251: 146-153.
- [10] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. Alignment induced aberration fields of next generation telescopes [C]//SPIE, 2008, 7068: 70680E1-70680E7.
- [11] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. Misalignment-induced nodal aberration fields in two-mirror astronomical telescopes[J]. *Appl Opt*, 2010, 9(16): D131-D144.
- [12] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. A unique astigmatic nodal property in misaligned Ritchey-Chrétien telescopes with misalignment coma removed [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5282-5288.
- [13] Schmid T, Rolland J P, Rakich A, et al. Separation of the effects of astigmatic figure error from misalignments using Nodal Aberration theory(NAT)[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17433-17477.