

三点支撑变形对三反射消像散望远镜像散场的影响

邹刚毅^{1,2} 樊学武¹ 庞志海¹ 王臣臣^{1,2} 李瑞昌^{1,2}

¹中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学应用研究室, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高大口径望远镜的装调效率,对具有三点支撑变形的大口径三反射消像散望远镜在装调过程中的像散场分布进行了研究。采用矢量像差理论和孔径坐标变换,分析了在孔径光阑和非孔径光阑处反射镜存在三点支撑变形时,像散在望远镜失调和非失调情况下的分布特性。最后,在光学设计软件 CODE V 中利用条纹 Zernike 多项式 Z_{10} 和 Z_{11} 来模拟反射镜三点支撑变形引入的面形误差,通过实际光线追迹对像散场分布特性进行了验证。分析结果表明:当三点支撑变形位于主镜(孔径光阑)上时,不会影响望远镜的像散场分布;当三点支撑变形位于次镜或三镜(非孔径光阑)上时,将会产生与视场共轭成线性的像散项,导致望远镜在失调或非失调情况下的像散出现不同的分布特性。在最终装调时,通过分析像散场的分布可对望远镜的装调状态进行定性的分析,从而为大口径三反射消像散望远镜的装配提供指导。

关键词 光学设计; 像散场; 矢量像差; 三点支撑变形; 三反射消像散望远镜

中图分类号 TG502.33 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0622002

Influence of Three-Point-Mount-Induced Deformation for a Three-Mirror-Anastigmatic Telescope on Its Astigmatic Field

Zou Gangyi^{1,2} Fan Xuewu¹ Pang Zhihai¹ Wang Chenchen^{1,2} Li Ruichang^{1,2}

¹Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to improve the efficiency of alignment for a three-mirror-anastigmatic (TMA) telescope with large aperture, the influence of three point mount induced (TPMI) deformation on its astigmatic field distribution in the aligning process is analyzed. Based on the vector aberration theory and aperture coordinate transformation, the astigmatic field distribution characters for the aligned and misaligned TMA telescope are analyzed with TPMI deformation on mirrors located at or away from the aperture stop. Finally, the surface error due to TPMI deformation is simulated by the optical design software CODE V using Z_{10} and Z_{11} , the terms of fringe Zernike polynomial. The characteristic field distribution of astigmatism is verified by the real-ray-tracing method. The results indicate that the astigmatic field distributions are not affected when the TPMI deformation is on the primary mirror (aperture stop), and it shows different characteristic field distributions when the TPMI deformation is on the secondary or tertiary mirror (not aperture stop) for the aligned or misaligned telescope because of producing astigmatism with the field conjugated and field linear. The aligning state of TMA telescope can be qualitatively analyzed by its astigmatic field distribution at the final aligning stage, which is quite instructive for the alignment of TMA telescopes with large aperture.

Key words optical design; astigmatic field; vector aberration; three-point-mount-induced deformation; three-mirror-anastigmatic telescope

OCIS codes 220.1010; 120.6650; 220.1140; 220.2740

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-01-28

基金项目: 西部之光项目(J14-032)

作者简介: 邹刚毅(1983—),男,博士研究生,工程师,主要从事光学系统设计、检测和装调等方面的研究。

E-mail: zougangyi@opt.ac.cn

导师简介: 樊学武(1972—),男,博士,研究员,主要从事光学系统总体设计、光学检测和装调等方面的研究。

E-mail: fanxuewu@opt.ac.cn

1 引 言

随着深空探测及天文遥感的不断发展,对大口径空间望远镜的需求也越来越迫切。大口径空间望远镜的设计、加工及装配已经成为当前空间光学研究的热点之一。随着口径的增大,大口径反射镜的支撑成为空间望远镜研制中的关键技术之一,并常采用三点或多点支撑方式来满足刚度和位置精度的设计要求。由于重力的影响,反射镜在地面装配时会存在一定的支撑变形,所产生的面形误差与光学系统的失调误差综合作用成为决定最终望远镜成像质量的关键因素。在大口径望远镜装配过程中,迫切需要一种像差分析理论以将各个误差源进行分离,从而在装配过程中给设计和装配人员提供理论指导。

近年来,国外学者对矢量像差理论进行了广泛的研究,取得了一系列重要的研究成果。Kevin P Thompson 等^[1-4]采用矢量像差理论对具有圆形或近似圆形光瞳的失对称光学系统的三阶像差特性进行了研究,并将矢量像差的表达式扩展到了五阶形式,理论分析的结果对于轴对称光学系统的装调具有重要的指导意义,但其并没有考虑光学元件面形误差的影响。Tobias Schmid 等^[5]采用矢量像差理论将光学系统反射镜的面形加工误差与失调误差进行了区分。Kyle Fuerschbach 等^[6-7]在矢量像差理论的指导下,将光学表面面形误差加入到了矢量像差的表达式之中。国内学者对矢量像差理论的研究起步较晚,但也取得了一定的进展^[8-11]。

本文在矢量像差理论和前人研究成果的基础上^[12-17],对具有三点支撑变形的三反射望远镜系统在非失调和失调两种状态下的像散场分布进行了研究,得到了不同情况的像散场分布特性,最后在光学设计软件中,通过具体的设计实例验证了理论分析结果的正确性。结果表明,像散场独特的分布特性可以将光学系统的失调与反射镜的三点支撑变形区分开来。

2 反射镜三点支撑变形引入的波像差

在光学检测领域,三点支撑(TPMI)变形误差又称为三叶草像散或椭圆彗差,对应条纹 Zernike 多项式的 Z_{10} 和 Z_{11} 项,其所引入的面形误差大小如图 1 所示,其中 C_{10} 和 C_{11} 为 Z_{10} 和 Z_{11} 项对应的系数。

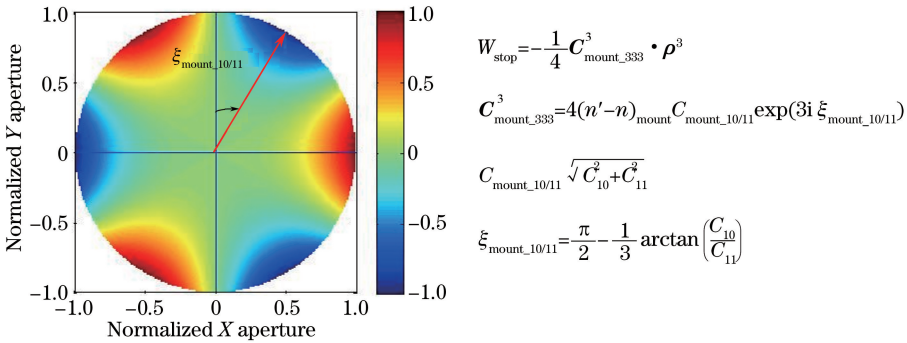


图 1 三点支撑变形引入的面形误差

Fig. 1 Surface profile error due to TPMI deformation

研究表明^[7],当三点支撑变形位于孔径光阑位置的反射镜上时,将在全视场内引入常数项椭圆彗差,所产生的波像差可以表示为

$$W_{\text{stop}} = -\frac{1}{4} C_{\text{mount}_333}^3 \cdot \rho^3, \tag{1}$$

式中 $C_{\text{mount}_333}^3$ 表示椭圆彗差面形误差的大小和方向,如图 2 所示。

当三点支撑变形位于非孔径光阑位置的反射镜上时,不同视场的光束在反射镜表面上的投影区域逐渐分离,单个视场光束对应的区域只是反射镜全口径的一部分,设反射镜的半口径为 a ,对应视场 \mathbf{H} 的光束在反射镜上的投影半径为 b ,这里不考虑渐晕,即认为各个视场在反射镜上的投影大小均相同。视场 \mathbf{H} 对应主光线与反射镜的交点为 $d\mathbf{H}$,定义归一化的孔径偏移矢量 $D\mathbf{H}$ 和孔径缩放因子 B 如图 3 所示,则子口径上的孔径矢量 ρ' 在全口径坐标系中可以表示为

$$\rho' = B\rho + D\mathbf{H}, \tag{2}$$

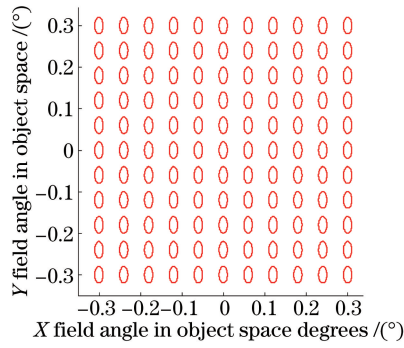


图 2 常数项椭圆彗差全视场分布示意图

Fig. 2 Full field distribution of constant elliptical coma

将(2)式代入(1)式中,通过矢量运算可以得到非光阑反射镜存在三点支撑变形时所产生的波像差为

$$W_{\text{not_stop}} = -\frac{1}{4} [C_{\text{mount_333}}^3 \cdot (B\rho + D)^3] = -\frac{1}{4} \left[B^3 (C_{\text{mount_333}}^3 \cdot \rho^3) + 3B^2 D (C_{\text{mount_333}}^3 \mathbf{H}^* \cdot \rho^2) + \right. \\ \left. 3BD^2 (C_{\text{mount_333}}^3 \mathbf{H}^{*2} \cdot \rho) + D^3 (C_{\text{mount_333}}^3 \cdot \mathbf{H}^3) \right], \quad (3)$$

式中第一项仍为常数项的椭圆彗差,但是相对于全孔径的椭圆彗差缩小了 B^3 倍;第二项为与视场共轭且成线性的像散项,具有独特的视场依赖关系,图 4 给出了其在全视场内的分布示意图,具有 1 个节点(零点),位于视场的中心,利用该项对望远镜像散场分布的影响可以判定反射镜是否存在三点支撑变形;第三和第四项分别为畸变和活塞误差,它们不影响成像的清晰度,这里不再考虑。

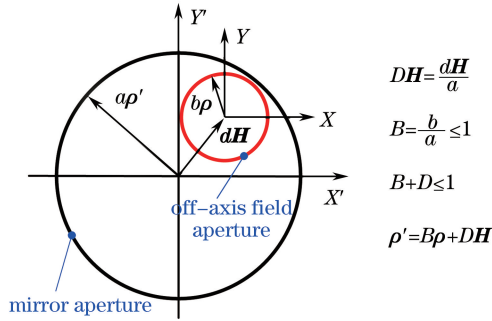


图 3 轴外视场光束在非孔径光阑反射镜上的投影示意图

Fig. 3 Projection schematic of off-axis field beam on mirror away from aperture stop

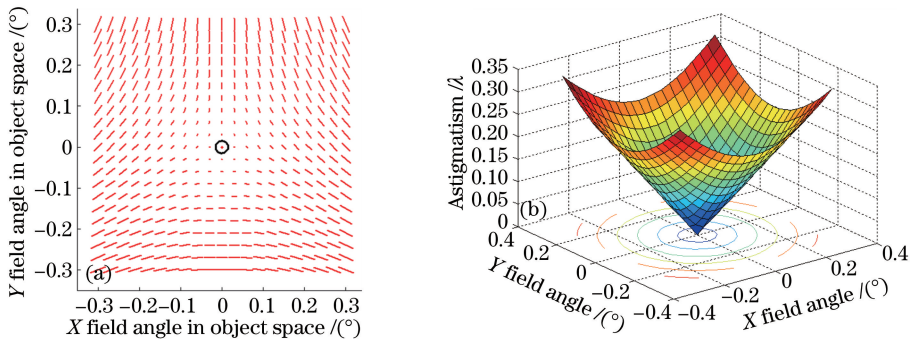


图 4 与视场共轭且成线性的像散场特征分布图。(a) 全视场显示图;(b) 立体图

Fig. 4 Characteristic distribution of linear astigmatism field and conjugated with field.

(a) Full field display; (b) stereo display

3 非孔径光阑处反射镜三点支撑变形对望远镜像散场的影响

当非孔径光阑处反射镜存在三点支撑变形时,除了在全视场内引入缩小 B^3 倍的常数项椭圆彗差外,还将引入与视场共轭且成线性的像散项,将其叠加到像散表达式中,通过分析就可以得到非孔径光阑处反射镜

存在三点支撑变形时望远镜的像散场分布特性。下面分别针对望远镜在未失调和失调两种情况下的像散场分布进行分析。

3.1 望远镜未失调

当望远镜装配良好,不存在失调时,像散可以表示为

$$W_{\text{not_stop}} = \left(\frac{1}{2} W_{222} \mathbf{H}^2 - \frac{3}{4} B^2 DC_{\text{mount}_333}^3 \mathbf{H}^* \right) \cdot \boldsymbol{\rho}^2, \quad (4)$$

对于三反射望远镜系统来说,光学设计时已经校正了三阶像散,即 $W_{222} = 0$,因此(4)式中第一项等于0,此时只具有第二项三点支撑变形所引入的与视场共轭成线性的像散,像散场分布如图4所示,其大小关于视场中心旋转对称。

3.2 望远镜失调

当望远镜装配过程中存在失调时,失调和反射镜三点支撑变形综合作用的像散场可以表示如下,其中失调矢量 \mathbf{A}_{222} 和 \mathbf{B}_{222}^2 的定义详见参考文献[1],在望远镜装配过程中,由于失调量较小,这里假定 $\mathbf{B}_{222}^2 \approx 0$ 。

$$W_{\text{not_stop}} = \left[\frac{1}{2} (W_{222} \mathbf{H}^2 - 2\mathbf{H}\mathbf{A}_{222} + \mathbf{B}_{222}^2) - \frac{3}{4} B^2 DC_{\text{mount}_333}^3 \mathbf{H}^* \right] \cdot \boldsymbol{\rho}^2, \quad (5)$$

对于三反射望远镜系统, $W_{222} = 0$,因此(5)式可以简化为

$$W_{\text{not_stop}} = - \left(\mathbf{H}\mathbf{A}_{222} + \frac{3}{4} B^2 DC_{\text{mount}_333}^3 \mathbf{H}^* \right) \cdot \boldsymbol{\rho}^2. \quad (6)$$

若 $\mathbf{H} = 0$,则(6)式等于0,即像散的一个零点位于视场的中心。若 $\mathbf{H} \neq 0$,利用矢量运算关系 $\mathbf{H}\mathbf{H}^* = |\mathbf{H}|^2$,则(6)式可以表示为

$$W_{\text{not_stop}} = - \left(\frac{\mathbf{H}^2 \mathbf{A}_{222}}{|\mathbf{H}|^2} + \frac{3}{4} B^2 DC_{\text{mount}_333}^3 \right) \mathbf{H}^* \cdot \boldsymbol{\rho}^2, \quad (7)$$

$$|\mathbf{A}_{222}| = \frac{3}{4} B^2 D |C_{\text{mount}_333}^3| \theta = \begin{cases} (3\xi_{\text{mount}_10/11} - \alpha) / 2 \\ (3\xi_{\text{mount}_10/11} - \alpha) / 2 - \pi, & \text{when } (3\xi_{\text{mount}_10/11} - \alpha) > 0, \\ (3\xi_{\text{mount}_10/11} - \alpha) / 2 + \pi, & \text{when } (3\xi_{\text{mount}_10/11} - \alpha) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中括号内的表示式与视场 \mathbf{H} 的大小无关,当满足(8)式中的条件时,像散在视场内 θ 方向上的值均为0,其中 α 表示失调矢量 \mathbf{A}_{222} 与 Y 轴正向的夹角。

图5给出了对应的像散场分布,可以看出在 $+45^\circ$ 和 -135° 两个方向上,像散值的大小为0,全视场内的像散大小关于像散为0的直线对称。图6给出了不满足(8)式中条件的像散场,此时像散的大小仍然具有线对称性,但像散在全视场内只有一个零点。若反射镜不存在三点支撑变形,图7给出了仅望远镜失调时的像散场分布,由图可知,仅存在失调时的像散与视场成线性,大小关于视场中心旋转对称。

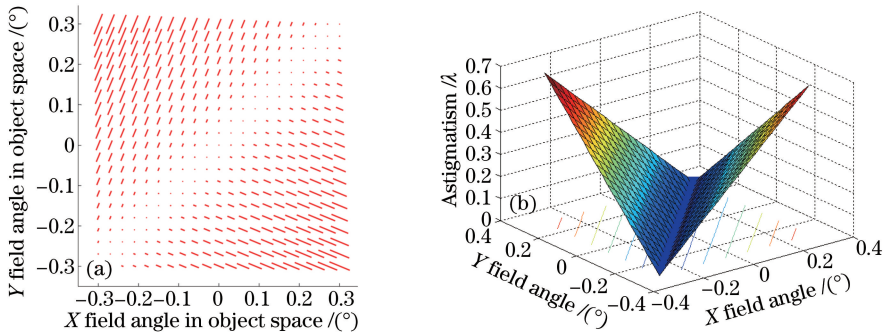


图5 望远镜存在失调及三点支撑变形且满足(8)式条件时的像散场分布特征图。(a)全视场显示图;(b)立体图
Fig. 5 Characteristic field distribution of astigmatism for misaligned telescope with TPMT deformation under condition of formula (8). (a) Full field display; (b) stereo display

可以看出:当三点支撑变形位于孔径光阑处反射镜上时,只产生常数项的椭圆彗差,不会影响像散场的分布;当三点支撑变形位于非孔径光阑处反射镜上时,望远镜在未失调和失调两种情况下的像散大小和方向分布各不相同。因此通过对望远镜全视场内像散场分布特性的分析,可以对反射镜支撑变形及望远镜失调

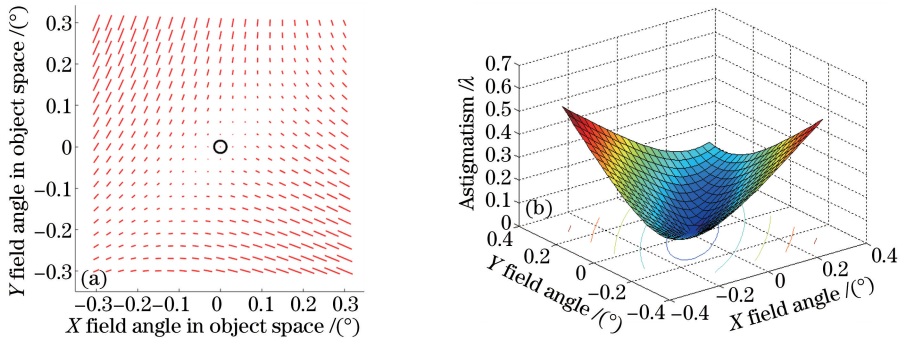


图 6 望远镜存在失调及三点支撑变形,不满足(8)式时的像散场特征分布图。(a)全视场显示图;(b)立体图
Fig. 6 Characteristic field distribution of astigmatism for misaligned telescope with TPMI deformation without condition of formula (8). (a) Full field display; (b) stereo display

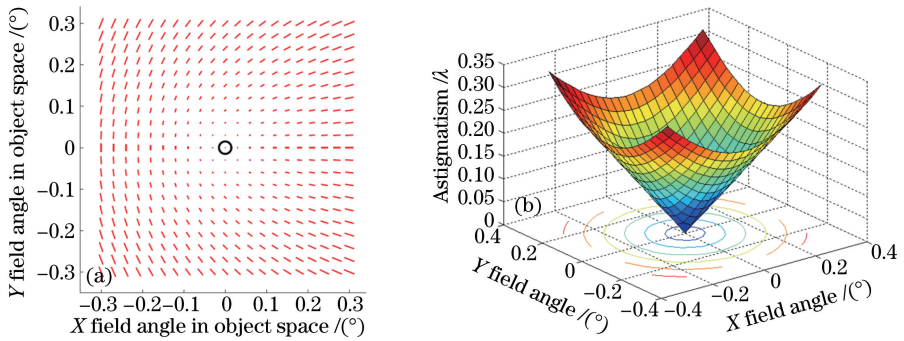


图 7 望远镜仅存在失调时的像散场特征分布图。(a)全视场显示图;(b)立体图
Fig. 7 Characteristic field distribution of astigmatism for only misaligned telescope. (a) Full field display; (b) stereo display

情况进行定性的判断,从而为大口径望远镜的装配提供指导。

4 光学系统实例分析

图 8 给出了三反射光学系统的设计光路图, F 数为 10, 入瞳直径为 1 m, 孔径光阑位于主镜上, 最终设计的 R_{RMS} 波前差小于 0.006λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

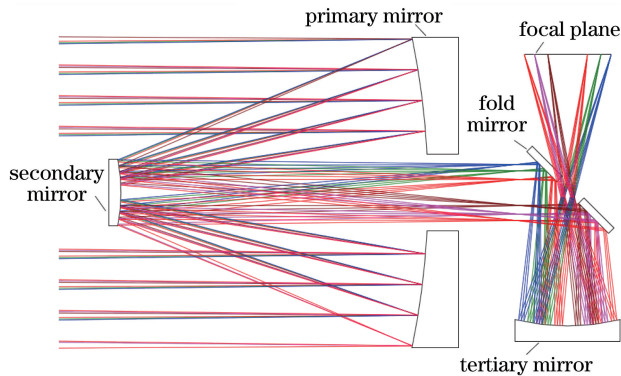


图 8 三反射消像散光学系统光路图
Fig. 8 Diagram of three mirror anastigmatic optical system

通过条纹 Zernike 多项式 Z_{10} 和 Z_{11} 来模拟三点支撑变形, 产生一个大小为 0.5λ , 方向为 0 的面形误差, 如图 9 所示, 将其代入到光学设计软件 CODE V 中分析不同情况下光学系统像散的分布特性。

4.1 光学系统未失调

当光学系统未失调, 在主镜上引入三点支撑变形时, 光学系统的像散场和椭圆彗差在全视场内的分布如

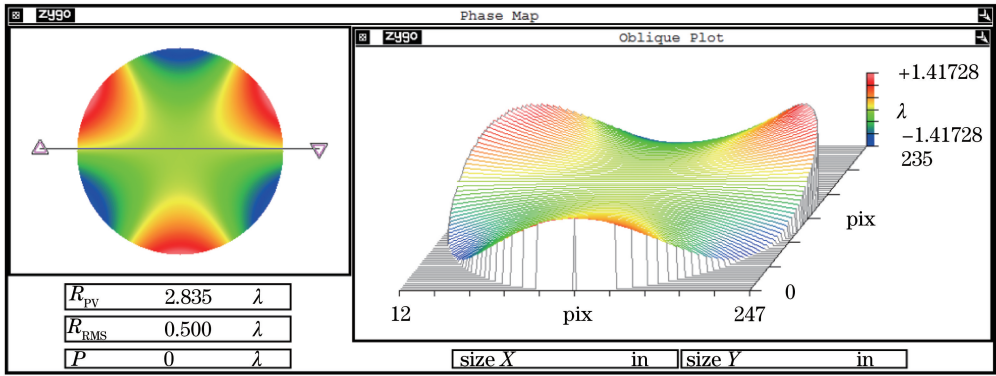


图 9 软件模拟的三点支撑面形误差

Fig. 9 Simulated surface profile error due to TPMI deformation

图 10 所示,可以看出,主镜上存在三点支撑变形时,在全视场将引入常数项的椭圆彗差,但光学系统的像散场分布保持不变。若在三镜上引入三点支撑变形,光学系统的像差分布如图 11 所示,像散将出现与视场共轭成线性的分布。由于各视场光束在三镜上投影口径约占全口径的 1/2.5,因此还引入了缩小约 0.06 倍的常数项椭圆彗差。

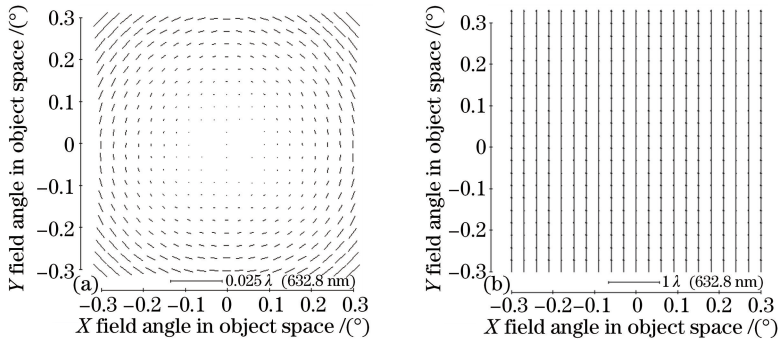


图 10 光学系统未失调,主镜具有三点支撑变形时的像差特征分布图。(a)像散;(b)椭圆彗差

Fig. 10 Characteristic field distribution of aberration for the aligned optical system with TPMI deformation on the primary mirror. (a) Astigmatism; (b) elliptical coma

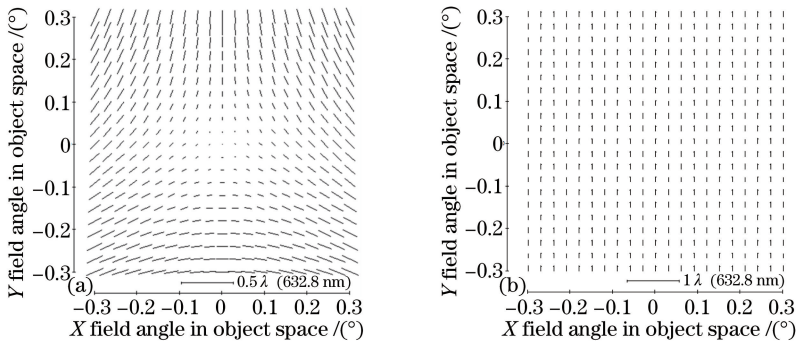


图 11 光学系统未失调,三镜具有三点支撑变形时的像差特征分布图。(a)像散;(b)椭圆彗差

Fig. 11 Characteristic field distribution of aberration for the aligned optical system with TPMI deformation on the tertiary mirror. (a) Astigmatism; (b) elliptical coma

4.2 光学系统失调

将次镜绕 Y 轴倾斜 0.1° ,当主镜上具有图 9 所示的三点支撑变形时,光学系统的像散场分布如图 12(a) 所示,像散与视场成线性的分布,具有一个位于视场中心附近的零点,这与光学系统仅具有失调时的像散场分布完全相同;当三镜上具有三点支撑变形时,光学系统的像散场分布如图 12(b) 所示,此时三点支撑变形产生的与视场共轭成线性的像散和次镜倾斜产生的与视场成线性的像散相互叠加,从而使像散在视场内

45°对角线方向上出现相消的分布现象。

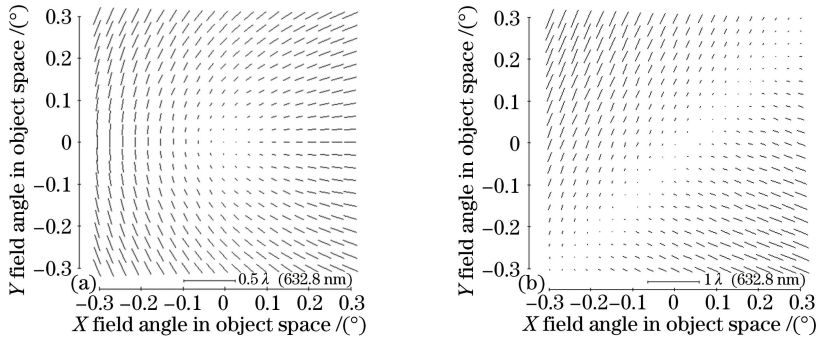


图 12 光学系统失调,反射镜具有三点支撑变形时的像散。(a)主镜;(b)三镜

Fig. 12 Astigmatism field for the misaligned optical system with TPMI deformation on mirror

(a) Primary mirror; (b) tertiary mirror

从以上基于 CODE V 实际光线追迹的分析结果可以看出:当光学系统未失调时,主镜具有三点支撑变形只会在全视场内引入常数项的椭圆彗差,不影响光学系统像散的分布;三镜具有三点支撑变形除了在全视场内引入缩小的常数项椭圆彗差外,还将引入与视场共轭、成线性的像散项。当光学系统失调时,主镜具有三点支撑变形不会影响光学系统像散的分布,此时与视场成线性的像散分布仅由光学系统失调所决定,在全视场内具有 1 个零点;三镜具有三点支撑变形将会使像散在全视场内沿某一方向上出现相消的分布现象。软件分析的结果与矢量像差理论分析结果相一致,验证了理论分析的正确性。

5 结 论

在望远镜最终装调时,传统的装调方法很少考虑反射镜支撑变形引起的面形误差影响,而仅通过调节各反射镜的相对位置来减小系统的波像差,很可能导致算法的不收敛。在矢量像差理论的指导下,对反射镜具有三点支撑变形的大口径三反射消像散望远镜的像散分布特性进行了研究,通过理论分析和实际光线追迹验证表明,在望远镜装调过程中,三点支撑变形位于孔径光阑或非孔径光阑处反射镜上时,光学系统的像散在全视场内将会出现不同的分布特性。研究表明,通过分析全视场内的像散(Z_5 、 Z_6)和椭圆彗差(Z_{10} 、 Z_{11})分布特性,可以对各反射镜的支撑状态进行定性的分析,使望远镜的最终装调过程更具有针对性。这对于大口径三反射消像散望远镜的装调具有重要的指导价值。

参 考 文 献

- 1 K P Thompson. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry [J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(7): 1389-1401.
- 2 K P Thompson. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the comatic aberrations [J]. J Opt Soc Am A, 2010, 27(6): 1490-1504.
- 3 K P Thompson. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the astigmatic aberrations [J]. J Opt Soc Am A, 2011, 28(5): 821-836.
- 4 K P Thompson, T Schmid, J P Rolland. Recent discoveries from Nodal aberration theory [C]. SPIE, 2010, 7652: 76522Q.
- 5 T Schmid, J P Rolland, A Rakich, *et al.*. Separation of the effects of astigmatic figure error from misalignment using Nodal aberration theory(NAT) [J]. Opt Express, 2010, 18(16): 17433-17477.
- 6 K Fuerschbach, J P Rolland, K P Thompson. Extending Nodal aberration theory to include mount-induced aberrations with application to freeform surfaces [J]. Opt Express, 2012, 20(18): 20139-20155.
- 7 K Fuerschbach, J P Rolland, K P Thompson. Theory of aberration field for general optical systems with freeform surfaces [J]. Opt Express, 2014, 22(22): 26585-26606.
- 8 Zhang Hu. Vector aberration theory with application to off axis head mounted display design [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010.

- 张 虎. 矢量像差理论及其在离轴头盔显示系统设计中的应用[D]. 北京:中国科学院大学, 2010.
- 9 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Misalignment induced aberration characteristic of TMA optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 653-657.
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 失调三反消像散光学系统像差特性[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 653-657.
- 10 Kong Xiaohui, Fan Xuewu. Alignment of two-mirror spherical optical system based on vector aberration theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 082202.
孔小辉, 樊学武. 基于矢量波像量理论的两镜系统装调技术研究[J]. *激光与光电子进展*, 2010, 47(8): 082202.
- 11 Shi Haodong, Jiang Huilin, Zhang Xin, *et al.*. Research on freeform optical system aberration characteristic based on vector aberration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1208003.
史浩东, 姜会林, 张 新, 等. 基于矢量像差的自由曲面光学系统像差特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1208003.
- 12 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *et al.*. Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422002.
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0422002.
- 13 K P Thompson, K Fuerschbach, Tobias Schmid, *et al.*. Using nodal aberration theory to understand the aberrations of multiple unobscured three mirror anastigmatic (TMA) telescopes[C]. *SPIE*, 2009, 743308.
- 14 A Rakich, J M Hill, C J Biddick, *et al.*. Use of aberrations in the alignment of the large binocular telescope optics[C]. *SPIE*, 2008, 7012: 70121L.
- 15 K P Thompson, T Schmid, J P Rolland. The misalignment induced aberration of TMA telescopes[J]. *Opt Express*, 2009, 16(25): 20345-20353.
- 16 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0722001.
巩 盾, 王 红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0722001.
- 17 Xu Shaoxiong, Chen Changzheng, Zhang Xingxiang, *et al.*. Coma-free compensation in perturbed on-axis three-mirror anastigmatic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022004.
徐少雄, 陈长征, 张星祥, 等. 失调同轴三反消像散系统彗差补偿[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022004.