

几种失调反射光学系统的波像差特性

史广维^{1,2}, 张新¹, 张建萍¹, 何锋赞¹, 王灵杰¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了描述失调状态下反射光学系统在整个像平面中的波像差分布特性, 从而对反射光学系统进行有效的装调, 对偏心和倾斜影响下的几种反射光学系统的三阶彗差和三阶像散进行了研究。首先, 对失调光学系统三阶波像差的矢量形式进行了推导。然后, 对失调状态下经典 Cassegrain 系统、Ritchey-Chrétien 系统和三反射镜消像散系统三阶彗差和三阶像散的分布情况进行了分析, 并且对两反射和三反射系统的装调进行了简要的讨论。使用 Zernike 多项式对视场中各个位置的波像差进行拟合, 分离出三阶彗差和三阶像散并进行了全视场显示。理论分析与实际拟合结果一致, 说明结论是正确的。

关键词: 像差理论; 波像差; 反射光学系统; 光学装调

中图分类号: O435.2 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0160-07

Wavefront aberration characteristics of several misaligned reflective optical systems

Shi Guangwei^{1,2}, Zhang Xin¹, Zhang Jianping¹, He Fengyun¹, Wang Lingjie¹

(1. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to characterize wavefront aberration behavior of misaligned reflective optical systems over the entire image plane, thereby realize effective alignment to reflective optical systems, the third order coma and third order astigmatism of several reflective optical systems with tilt and decentration were studied. Firstly, the vector form of the third order wavefront aberration of misaligned optical system was deduced. Then, the distribution characteristics of third order coma and third order astigmatism of misaligned classical Cassegrain systems, Ritchey-Chrétien systems and three mirror astigmatism systems in the image plane were analyzed. Finally, the alignment of two mirror and three mirror optical systems was briefly discussed. Moreover, Zernike polynomials were used to fit wavefront aberrations of grid sampling points in the view of field. Third order coma and third order astigmatism were separated and displayed over the whole field of view. Theoretical analysis and practical fitting results were similar, which shows that conclusions are correct.

Key words: aberration theory; wavefront aberration; reflective optical systems; optical alignment

收稿日期: 2011-05-07; 修订日期: 2011-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61007009)

作者简介: 史广维(1983-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计和像差理论研究。Email: dqsgw@yahoo.cn

导师简介: 张新(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事成像、非成像光学系统设计研究。Email: optlab@ciomp.ac.cn

0 引言

与折射光学系统相比，反射光学系统具有使用波段范围宽、易于实现轻量化、热性能好、结构紧凑等优点。尤其是大尺寸的光学元件，反射材料比透射材料更容易得到。因此，反射光学系统被广泛应用于大口径天文望远镜、空间遥感相机以及红外或紫外光学系统之中。随着光学制造技术的不断发展，反射光学系统所使用的非球面光学元件的加工和检测方法已经比较成熟，而系统装调精度要求高，装调比较困难。为了对反射光学系统进行有效的装调，科研人员从 20 世纪 80 年代开始进行计算机辅助装调技术研究^[1-3]，并在反射光学系统装调过程中起到了很大的作用，但是计算机辅助装调在实际应用中也存在一定的缺点和局限性^[4-5]。文中从矢量波像差理论^[6-7]出发，推导了比较常用的经典 Cassegrain 系统、Ritchey-Chrétien 系统和三反镜消像散光学系统^[8-9] (TMA)在失调(文中失调仅包括小量偏心和倾斜)状态下的波像差特性，指出了在小量偏心和倾斜影响下这 3 种反射系统三阶彗差和三阶像散的分布情况。3 种结构形式涵盖了失调反射光学系统三阶彗差和三阶像散可能出现的情况，了解它们的像差特性将会对反射光学系统装调有一定的指导作用。

1 失调光学系统的三阶波像差

轴对称光学系统三阶波像差的标量形式可以表示为：

$$W=W_{040} \rho^4+W_{131} H \rho^3 \cos \phi+W_{222} H^2 \rho^2 \cos^2 \phi+W_{220} H^2 \rho^2+W_{311} H^3 \rho \cos \phi \quad (1)$$

式中： H 和 ρ 分别为归一化的视场和瞳坐标； ϕ 为瞳坐标相对于任意选择的子午平面的方位角； W_{040} 、 W_{131} 、 W_{222} 、 W_{220} 、 W_{311} 分别表示系统三阶的球差、彗差、像散、场曲、畸变的系数。将视场坐标和瞳坐标用矢量形式表示，可以得到轴对称系统矢量形式的三阶波像差表达式：

$$W=W_{040}(\rho \cdot \rho)^2+W_{131}(\mathbf{H} \cdot \rho)(\rho \cdot \rho)+W_{222}(\mathbf{H} \cdot \rho)^2+W_{220}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})(\rho \cdot \rho)+W_{311}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{H} \cdot \rho) \quad (2)$$

光学系统发生失调后，系统的波像差将发生变

化，但是仍满足两个性质^[6]：一个光学系统像面上的像差是每个表面像差贡献之和；一个表面像差贡献是以连接该表面出瞳中心和曲率中心的直线为中心的。由此可知，在失调的光学系统中每个表面在像面处像差贡献中心与像面中心不再重合。因此，需要引入一个矢量来表示失调光学系统相对于轴对称光学系统的像差贡献中心的变化。在失调光学系统中，每个表面在像面处像差贡献中心不同，可以由像差中心偏离矢量 σ_j 来表示第 j 个表面的像差贡献中心点位置。对于球面， σ_j 为：

$$\sigma_j=-\bar{i}_j/\bar{i}_j=-[(\bar{u}_j+c_j\bar{y}_j)-\bar{\beta}_{0j}]/\bar{i}_j \quad (3)$$

对于非球面， σ_j 为

$$\sigma_{Aj}=(\delta V_j-\bar{y}_j)/\bar{y}_j \quad (4)$$

式中： c_j 为第 j 个表面的曲率； \bar{i}_j 、 \bar{y}_j 为无失调的光学系统主光线在第 j 个表面上的入射角和入射高度； \bar{u}_j 、 \bar{y}_j 为在失调光学系统中光轴光线(OAR)在第 j 个表面上物方的孔径角和入射高度，光轴光线是通过失调光学系统每个表面的物、像中心和光瞳中心的光线； $\bar{\beta}_{0j}$ 为等效倾斜矢量 $\bar{\beta}_{0j}=\beta_j+\delta V_j$ ， β_j 为第 j 个表面的倾斜矢量， δV_j 为第 j 个表面顶点的偏心矢量。那么，在像面中视场点 H 处第 j 个表面的有效视场 H_{Ej} 应为 $(H_j-\sigma_j)$ ，如图 1 所示。

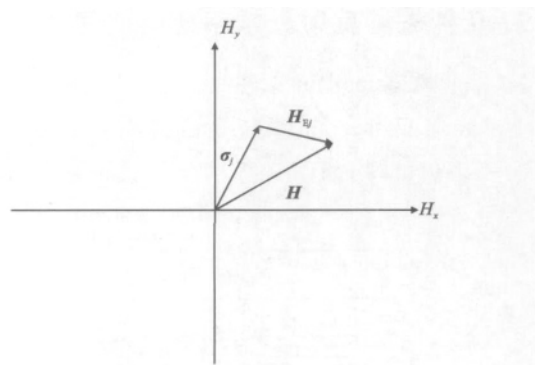


图 1 像面中表面 j 的有效视场 H_{Ej}

Fig.1 Effective field H_{Ej} for surface j in the image plane

基于以上分析可以看出，光学系统的每个表面都在像面处产生一个以该表面的三阶像差系数为权重，以矢量 σ_j 顶点为中心的像差场，失调系统总的像差是每个表面贡献之和。失调光学系统的三阶波像差可以表示为：

$$W = \sum_j W_{040j} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + \sum_j W_{131j} [(H - \boldsymbol{\sigma}_j) \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{222j} [(H - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]^2 + \sum_j W_{220j} [(H - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (H - \boldsymbol{\sigma}_j)] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{311j} [(H - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (H - \boldsymbol{\sigma}_j)] [(H - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}] \quad (5)$$

在使用干涉测量法对失调光学系统波像差进行检测时,只能得到球差项、彗差项和像散项,所以只讨论公式(5)右边前3项。球差项是与视场无关的量,不受小量偏心和倾斜的影响。将公式(5)右边第2、3项展开,得到失调光学系统的三阶彗差和三阶像散表达式分别为:

$$W_{\text{彗差}} = [(W_{131} H - A_{131}) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \quad (6)$$

$$W_{\text{像散}} = (W_{222} H^2 - 2H A_{222} + B_{222}^2) \cdot \boldsymbol{\rho}^2 \quad (7)$$

式中

$$A_{131} = \sum_j W_{131j} \boldsymbol{\sigma}_j \quad (8)$$

$$A_{222} = \sum_j W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j \quad (9)$$

$$B_{222} = \sum_j W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j^2 \quad (10)$$

基于公式(6)和(7),对经典 Cassegrain 系统、Ritchey-Chrétien 系统和三反镜消像散光学系统在失调状态下的三阶彗差和三阶像散的分布情况进行分析。

2 几种失调反射光学系统的波像差特性

2.1 经典 Cassegrain 系统

经典 Cassegrain 系统是由抛物面主镜和双曲面次镜组成(结构如图 2 所示),主镜的像点与双曲面

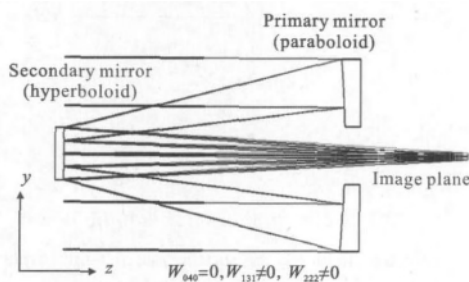


图 2 经典 Cassegrain 系统结构图

Fig.2 Schematic layout of classical Cassegrain systems

的一个焦点重合。因此,该系统对轴上点成理想像即无球差,其他三阶像差都没有校正,所以视场很小。与视场呈线性关系的三阶彗差是限制经典 Cassegrain

系统视场增大的主要像差。

在失调状态下,经典 Cassegrain 系统的三阶彗差和三阶像散可用公式(6)、(7)进行分析。将两式中的矢量归一化,得:

$$W_{\text{彗差}} = W_{131} [(H - a_{131}) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) \quad (11)$$

$$W_{\text{像散}} = W_{222} [(H - a_{222})^2 + b_{222}^2] \cdot \boldsymbol{\rho}^2 \quad (12)$$

式中

$$a_{131} = A_{131} / W_{131} \quad (13)$$

$$a_{222} = A_{222} / W_{222} \quad (14)$$

$$b_{222}^2 = B_{222}^2 / W_{222} - a_{222}^2 \quad (15)$$

公式(11)、(12)分别是与视场呈线性、二次方关系的等式。为了更好的理解失调状态下系统的三阶彗差和三阶像散,求出零彗差点和零像散点。对于公式(11)、(12),零彗差和零像散的视场点分别为:

$$H = a_{131} \quad (16)$$

$$H = a_{222} \pm ib_{222} \quad (17)$$

基于以上分析可以看出,在失调状态下经典 Cassegrain 系统的三阶彗差仍然保持旋转对称性,但对称中心即零彗差点不再位于视场中心,将发生偏移,偏移量大小由 a_{131} 确定;系统的三阶像散失去了旋转对称性,在视场中将出现两个零像散点即双节点像散(Binodal astigmatism),位置由 $a_{222} \pm ib_{222}$ 确定。

下面以实际光学系统为例进行定量分析,经典 Cassegrain 系统的主镜口径为 2 m (光阑位于主镜),系统焦距为 20 m,全视场为 0.3° ,详细参数如表 1 所示。两反光学系统在进行装调过程中通常以主镜作为基准,即光轴穿过主镜的顶点和曲率中心而对次镜进行装调。对次镜引入小量偏心和倾斜,沿着 X、Y 轴的偏心分别为 -0.15 mm、 0.2 mm,绕着 X、Y 轴的倾斜分别为 -0.025° 、 0.02° 。

图 3 显示了主镜、次镜的球面部分和非球面部分

表 1 经典 Cassegrain 系统的光学参数

Tab.1 Optical parameters of classical Cassegrain systems

Surface	Conic constant	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Y aperture /mm
PM(Stop)	-1.000 00	-10.000 000	-3 675.00	2 000.1
SM	-2.777 19	-3 533.333	5 300.00	275.4

分的三阶彗差系数和三阶像散系数, A 代表非球面。图 4 是通过计算得到的次镜球面和非球面的像差中心偏移矢量。将图 3、图 4 中的数值带入到公式(13)、(15), 可求出失调经典 Cassegrain 系统彗差零点位置和双节点像散位置, 计算过程中涉及到矢量乘法请见参考文献[6]。

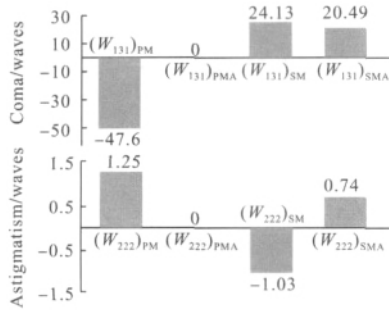


图 3 经典 Cassegrain 系统主镜、次镜的球面和非球面部分的彗差和像散波像差系数

Fig.3 Waves aberration coefficients for coma and astigmatism for spherical and aspheric departure of primary mirror and secondary mirror of classical Cassegrain systems

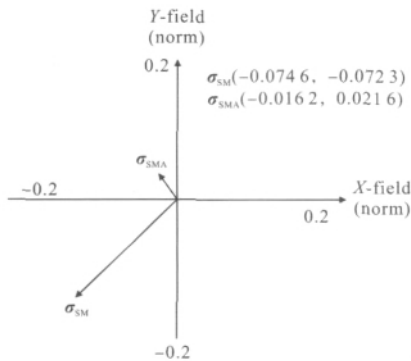


图 4 经典 Cassegrain 系统次镜球面和非球面的像差偏移矢量

Fig.4 Aberration field decentration vector for spherical and aspheric departure of secondary mirror of classical Cassegrain systems

使用 Zernike 多项式对视场中各个位置的波像差进行拟合, 可以提取出彗差项和像散项。 Z_7 、 Z_8 是与光学系统三阶彗差有关的系数; Z_5 、 Z_6 是与三阶像散有关的系数。利用这 4 个系数可以画出视场中各个位置的三阶彗差和三阶像散的大小和方向。图 5(a)、(b) 分别是利用此方法显示出在理想装调情况下经典 Cassegrain 系统的三阶彗差和三阶像散分布, 可以看出零彗差点和零像散点均位于视场的中心。图 6 显示了存在失调的经典 Cassegrain 系统的彗差和像散分布, 图中将由 a_{131} 和 $a_{222} \pm ib_{222}$ 确定的彗差零点和双

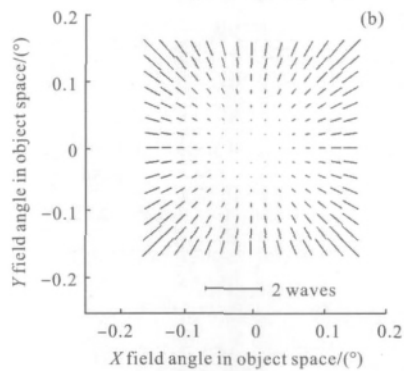
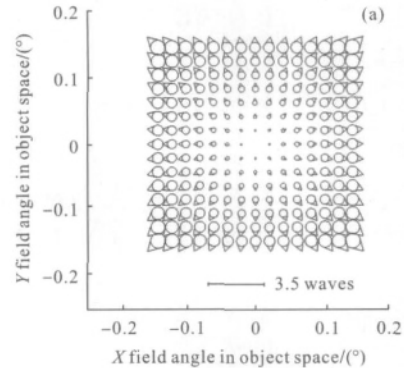


图 5 无失调的经典 Cassegrain 系统

Fig.5 Aligned classic Cassegrain systems

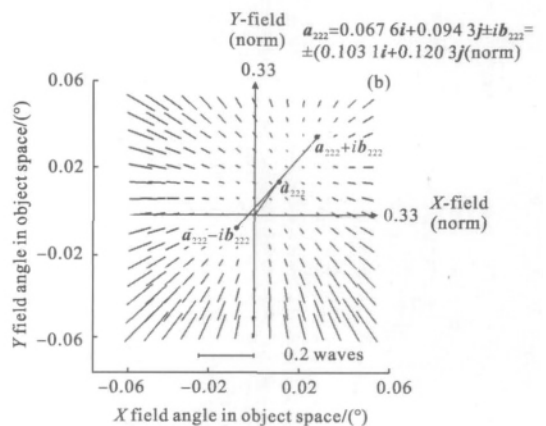
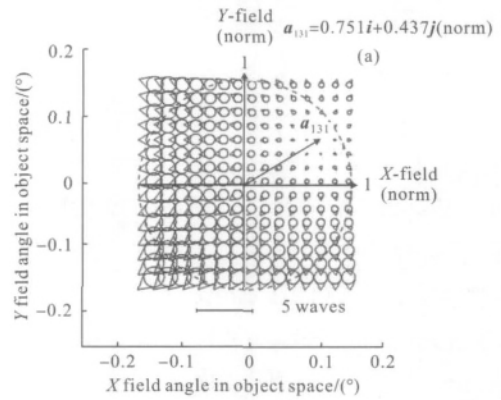


图 6 失调的经典 Cassegrain 系统

Fig.6 Misaligned classic Cassegrain systems

节点像散计算结果画在一幅图中, 可见理论分析与实际模拟结果一致。为了获得较佳的双节点像散显示效果, 图 6(b)使用了 0.05° 以内的视场。

2.2 Ritchey-Chrétien 系统

Ritchey-Chrétien 系统主、次镜均为双曲面(结构见图 7)。此结构形式的系统校正了球差和彗差, 由

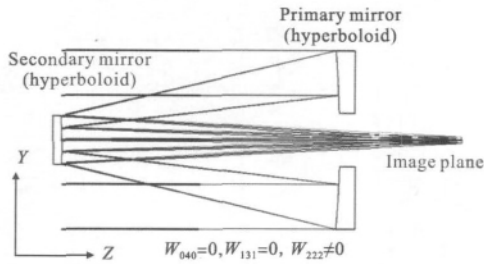


图 7 经典 Ritchey-Chrétien 系统结构图

Fig.7 Schematic layout of classical Ritchey-Chrétien systems

于像散和场曲未校正, 限制了光学系统视场的增大。处于失调状态的 Ritchey-Chrétien 系统, 视场中三阶像散分布与经典 Cassegrain 系统相同, 即为双节点像散, 此处不多赘述。由于 Ritchey-Chrétien 系统校正了三阶彗差, 那么彗差的分布与失调经典 Cassegrain 系统不同。将 $W_{131}=0$ 代入公式(6)将得到:

$$W_{\text{彗差}} = -(A_{131} \cdot \rho)(\rho \cdot \rho) \quad (18)$$

式中: A_{131} 是常矢量。公式(18)说明在失调状态下, Ritchey-Chrétien 系统的三阶彗差不因视场的变化而改变, 整个视场中的彗差大小相等、方向相同, 即为常数彗差。同样, 利用 Zernike 多项式进行波像差拟合, 得到失调前后 Ritchey-Chrétien 系统的三阶彗差分布, 如图 8 所示, 与理论分析结果吻合。

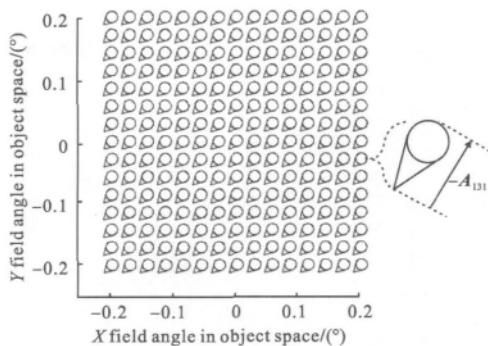


图 8 失调 Ritchey-Chrétien 系统的三阶彗差

Fig.8 Third order coma of misaligned Ritchey-Chrétien

对两反光学系统进行装调时, 次镜必须同时满

足:

$$A_{131} = (W_{131})_{SM} \sigma_{SM} + (W_{131})_{SMA} \sigma_{SMA} = 0 \quad (19)$$

$$A_{222} = (W_{222})_{SM} \sigma_{SM} + (W_{222})_{SMA} \sigma_{SMA} = 0$$

$$(B_{222}^2 \approx 0) \quad (20)$$

式中: σ_{SM} 、 σ_{SMA} 为次镜球面、非球面的像差中心偏移向量; $(W_{131})_{SM}$ 、 $(W_{131})_{SMA}$ 为次镜球面、非球面的三阶彗差贡献; $(W_{222})_{SM}$ 、 $(W_{222})_{SMA}$ 为次镜球面、非球面的三阶像散贡献。只消除轴上点的彗差的装调方法即满足公式(19)是不可靠的, 光学系统仍可能处于失调状态, 存在双节点像散。

2.3 三反射镜消像散光学系统 TMA

系统是目前应用较多的结构形式, 它校正了球差、彗差和像散, 适当的分配光焦度还可以消除场曲, 可在较大视场范围内有良好的成像质量。TMA 系统的结构形式很多, 各镜多为二次曲面, 为了平衡像差有些情况下也采用高次非球面。图 9 为 TMA 系统示意图。

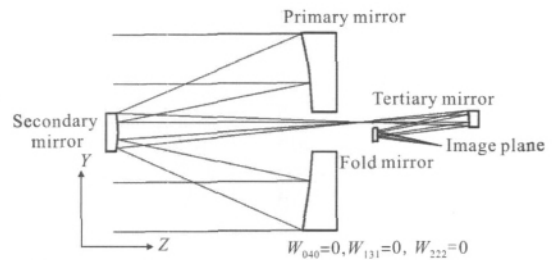


图 9 TMA 系统结构图

Fig.9 Schematic layout of TMA systems

由于 TMA 光学系统的调整变量多、精度要求高, 所以该系统的装调很难。在三反镜光学系统设计时, 整个光学系统的性能是初级像差与高级像差相互平衡的结果。当光学系统处于失调状态时, 高级像差对整个系统的性能影响很小, 三阶彗差和三阶像散成为限制光学系统性能的主要像差。因此, 对于 TMA 系统仅考虑三阶彗差和三阶像散的影响。

TMA 系统无三阶彗差, 在失调状态下该系统的三阶彗差分布与 Ritchey-Chrétien 系统相同(见图 8), 在此不多讨论。三反射镜光学系统没有三阶像散, 即 $W_{222}=0$, 因此公式(7)将变为:

$$W_{\text{像散}} = (-2HA_{222} + B_{222}^2) \cdot \rho^2 \quad (21)$$

失调三反镜光学系统像散包括两项, 第一项与视场成线性关系 ($-2HA_{222}$), 第二项为常数像散项 B_{222}^2 。 B_{222}^2 与元件失调量的二次方成正比, 当失调量很小时 $B_{222}^2 \approx 0$ 。

$$W_{\text{像散}} = -2HA_{222} \cdot \rho^2 \quad (22)$$

式中: A_{222} 是个常矢量, 说明失调状态下 TMA 系统视场中任意一点三阶像散大小与视场大小呈线性关系; 三阶像散方向取决于轴对称矢量和常矢量 A_{222} , 是两者之积 HA_{222} 与 X 正方向夹角的一半。图 10 显示出在轴对称的两个视场位置处像散的方向, 可见像散方向不再对称。

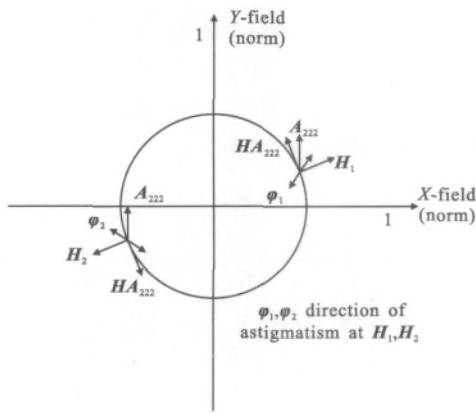


图 10 不同视场处位置像散的方向

Fig.10 Directions of astigmatism at different field

使用光学设计软件, 沿着视场的 +Y 轴方向进行近轴光线追迹, 可以得到失调前后 TMA 系统的子午和弧矢焦面变化, 如图 11 所示。图 11(a) 说明设计时整个视场中像散校正很好, 图 11(b) 可以看出子

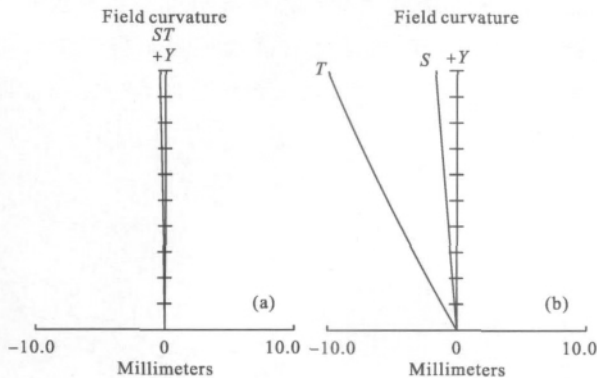


图 11 无失调、失调状态下的 TMA 系统的子午、弧矢场曲

Fig.11 Tangential and sagittal field curvature of an aligned TMA and misaligned TMA

午场曲和弧矢场曲在 +Y 轴方向近似两条直线, 表明了三阶像散与视场成线性关系。对利用 Zernike 多项式进行波像差拟合, 得到失调前后三反射镜消像散系统的三阶像散全视场显示如图 12 所示。

与两反光学系统装调类似, 三反射镜光学系统同样把公差较为敏感的主镜作为基准, 对次镜和三镜进行装调。将次镜、三镜的有关参数代入公式(8)和(9), 得:

$$A_{131} = (W_{131})_2 \sigma_2 + (W_{131})_{2A} \sigma_{2A} + (W_{131})_3 \sigma_3 + (W_{131})_{3A} \sigma_{3A} = 0 \quad (23)$$

$$A_{222} = (W_{222})_2 \sigma_2 + (W_{222})_{2A} \sigma_{2A} + (W_{222})_3 \sigma_3 + (W_{222})_{3A} \sigma_{3A} = 0 \quad (B_{222}^2 \approx 0) \quad (24)$$

公式(21)、(22)中的 σ_2 、 σ_{2A} 、 σ_3 、 σ_{3A} 都是相对独立的变量, 两式组成了不定方程组, 说明次镜、三镜的偏心和倾斜存在的耦合关系, 即使将整个视场中的三阶彗差和三阶像散全部消除, TMA 光学系统仍有可能处于失调状态。

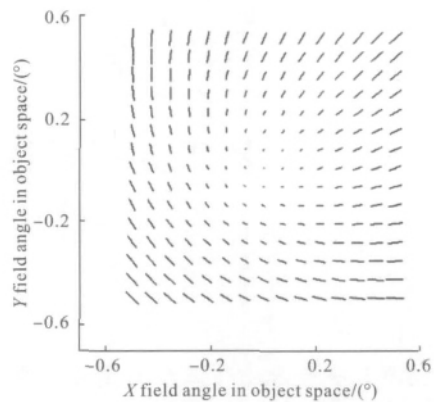


图 12 失调 TMA 系统的三阶像散

Fig.12 Third order astigmatism of misaligned TMA

3 结论

基于矢量像差理论对失调的经典 Cassegrain 系统、Ritchey-Chrétien 系统和 TMA 系统的三阶彗差和三阶像散进行了分析, 并且对这 3 种系统的装调情况进行了讨论。结果表明: (1) 失调的经典 Cassegrain 系统彗差零点将偏离视场的中心, 出现双节点像散; (2) 失调 Ritchey-Chrétien 系统整个视场中三阶彗差的大小和方向为常数, 同样会出现双节点像散; (3) 失调的三反射镜消像散系统将会出现与视场成线性关

系、方向非对称的三阶像散,三阶彗差分布形式与失调 Ritchey-Chrétien 系统相同。已知这几个结构形式的光学系统失调状态下的像差特性,将会对此类系统的装调有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] Rimmer M P. A computer aided optical alignment method [C]//SPIE, 1990, 1271: 363-368.
- [2] Jeong H J, Lawrence G N, Nahm K B. Auto-alignment of a three-mirror off-axis telescope by reverse optimization and end-to-end aberration measurements [C]//SPIE, 1987, 818: 419-430.
- [3] Figoski J W. Design and tolerance specification of a wide-field, three-mirror, unobscured, high-resolution sensor [C]//SPIE, 1989, 1049: 157-165.
- [4] Kim S, Yang H S, Lee Y W. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [5] Lee H, Dalton G B, Tosh I A, et al. Computer-guided alignment II: optical system alignment using differential wavefront sampling [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15424-15437.
- [6] Thompson K P. Aberration field in tilted and decentered optical systems[D]. Tucson: University of Arizona, 1980.
- [7] 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.
- [8] 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镜系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 500-504.

下期预览

基于大口径薄膜反射的空间聚能系统

毛冰晶, 郭倩蕊, 王本欣, 张天湘

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 能源是航天器能够正常工作的基本保证, 太阳能、引力能、真空能等太空即时补给能源是航天器供能的焦点。提出基于大口径薄膜反射的空间聚能系统的研究方案, 利用充气式囊状薄膜反射镜结构聚焦太阳能, 在焦斑处结合热电转换技术, 实现了太阳能的汇集和能量的热电转换, 并应用仿真软件模拟得到了不同焦距值的反射面聚焦效果的对比数据, 验证了方案的可行性。所提出的以光、热、电三种能量形式为飞行器供能的设想为空间飞行器能源系统的设计提供了新思路和新技术。