

大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响

庞志海 樊学武 陈钦芳 马 臻 邹刚毅

(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)

摘要 依据波像差理论和坐标变换分析了大口径反射镜面形误差对光学系统初级像差特性的影响。利用 Fringe Zernike 多项式表示光学系统的波像差和反射镜面形误差,通过变换矩阵分析可知当系统孔径光阑(出瞳或入瞳)光学表面存在面形误差时,将会在全视场内引入常量的波像差系数。如果非系统孔径光阑表面存在面形误差,由于孔径变换的原因,除了在全视场内引入的常量波像差系数外,还将会在全视场内引入低阶的波像差系数且其零点位于中心视场,不同的波像差系数与视场的依据关系不同。分析结果表明利用坐标变换矩阵可以对反射镜面形误差引入的波像差进行定性分析,以提高大口径反射光学系统的装调效率。

关键词 光学设计;波像差;面形误差;光学系统;三反射镜消像散系统;变换矩阵

中图分类号 TG502.33 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0422002

Influence of Surface-Profile Error of Larger Mirror on Aberrations Characteristics of Optical System

Pang Zhihai Fan Xuewu Chen Qinfang Ma Zhen Zou Gangyi

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

Abstract Based on the wavefront aberration theory and the coordinates transform, the influence of surface-profile error of large mirror on aberration characteristic of optical system is analysed. The optical wavefront aberration and surface-profile error of mirror can be expressed as Fringe Zernike polynomial. The surface profile error on the surface of the system aperture diaphragm (exit pupil or entrance pupil) will introduce constant wavefront aberration coefficient in the full field by analysing the transformation matrix. The error on a surface not at pupil will lead lower order wavefront aberration coefficient in the optical system, the relation between different wavefront aberrations coefficient and fields is different, and the location zero for the lower aberration coefficient always resides at the center of the field of view. The result shows that it's possible to analyse the wavefront aberration caused by surface-profile error of the reflective mirror using coordinate transformation matrix for improving the efficiency of the alignment.

Key words optical design; wavefront aberration; surface profile error; optical system; three-mirror anastigmatic system; transform matrix

OCIS codes 220.1140; 120.6650; 220.1010

1 引 言

近年来,随着光学制造与检测技术的发展,大口径非球面反射镜得到了广泛的应用。长焦距、大视场、大口径和宽波段的全反射式相机系统^[1,2]被越来越广泛地应用于民用航空、航天领域,如 R-C 系统、卡塞格林系统及三反射镜消像散系统(TMA)等。相机光学系统最终的成像质量不仅受到设计时

系统自身像差校正情况的影响,还受光学系统装调误差和反射镜面形误差的影响。

Thompson 等^[3~11]利用矢量波像差理论分析了轴对称光学系统存在装调误差(反射镜的偏摆、偏心等)时系统像差特性,该理论分析以反射镜不存在任何面形误差为基础。反射镜的面形误差包含反射镜制造误差和装调误差^[12~14],其中装调误差是指反射

收稿日期: 2012-11-01; 收到修改稿日期: 2012-11-28

基金项目: 青年科学与基金项目(Y111B6150Z)资助课题。

作者简介: 庞志海(1985—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计和检测与装调等方面的研究。

E-mail: uestc_pzh@126.com

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

E-mail: 307604830@sina.com

镜与镜框存在应力而导致镜面变形引入的面形误差、由于温度变化引起的热变形误差和大口径反射镜的自重变形误差等。本文以波像差理论和坐标变换为基础,分析大口径反射镜存在面形误差时对光学系统像差特性的影响,并利用光学设计软件 CODE V 对分析结果进行了验证。

2 理论模型分析

2.1 理论模型

相机光学系统的像差可以表示为

$$W = W_{\text{nominal}} + W_{\text{alignment}} + W_{\text{figure error}}, \quad (1)$$

式中 W_{nominal} 为光学系统设计时的剩余像差, $W_{\text{alignment}}$ 表示由于光学系统装调误差而导致的像差, $W_{\text{figure error}}$ 表示由于反射镜面形误差而导致的像差。对于没有装调误差且设计剩余误差很小的光学系统,可认为相机光学系统的像差由反射镜面形误差产生。由波像差理论^[3~5,15]可知,系统波像差是系统中各个独立反射镜波像差贡献量之和。反射镜面形误差可以利用 Fringe Zernike 多项式表示:

$$W(\rho, \phi) = \sum_{j=1}^{36} C_j Z_j(\rho, \phi), \quad (2)$$

同理,光学系统的波像差表示为

$$W(\rho, \phi) = \sum_{k=1}^n (1 - n_k) \sum_{j=1}^{36} C_j Z_j(\rho, \phi), \quad (3)$$

式中 ρ 为出瞳处归一化孔径, ϕ 为出瞳处孔径角, $Z_j(\rho, \phi)$ 为 Fringe Zernike 多项式, C_j 为 Fringe Zernike 多项式的系数, n 为光学系统中光学表面个

数, n_k 为系统中第 k 个表面的折射率(对于反射面, $n_k = -1$)。对于反射光学系统中的某反射镜面,不同视场的光线轨迹不同(图 1),因此不能简单地将反射镜的全口径面形误差系数直接叠加为系统各视场的波像差系数。

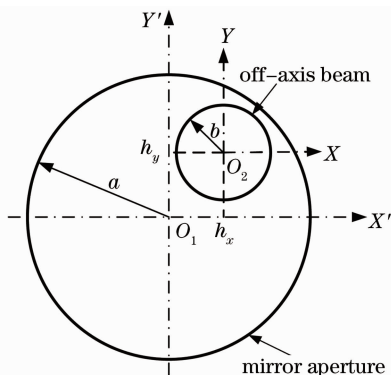


图 1 离轴光线轨迹示意图

Fig. 1 Schematic for off-axis beam track

分别对图 1 中反射镜的全口径 O_1 和轴外视场的子孔径 O_2 进行归一化:

$$\begin{cases} x' = \frac{X'}{a} & y' = \frac{Y'}{a} & \rho' = \sqrt{x'^2 + y'^2} \\ x' = \rho' \cos \theta' & y' = \rho' \sin \theta' \\ x = \frac{X}{b} & y = \frac{Y}{b} & \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ x = \rho \cos \theta & y = \rho \sin \theta \end{cases}, \quad (4)$$

定义孔径压缩比因子 B 和相对偏心量因子 H (光学系统的不同视场),其全口径与轴外视场子孔径之间的坐标变换关系为

$$\begin{cases} B = \frac{b}{a} \leq 1 \\ H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \\ \rho' \cos \theta' = B\rho \cos \theta + H_x \\ \rho'^2 = B^2 \rho^2 + 2H_x B\rho \cos \theta + 2H_y B\rho \sin \theta + H^2 \end{cases} \quad \begin{cases} H_x = \frac{h_x}{a} & H_y = \frac{h_y}{a} \\ x' = x + H_x & y' = y + H_y, \\ \rho' \sin \theta' = B\rho \sin \theta + H_y \end{cases}, \quad (5)$$

反射镜面形误差可以通过高准确度的干涉检测技术获得,利用(2)式表示反射镜全口径面形误差:

$$W'(\rho', \theta') = \sum_{j=1}^{36} C'_j Z'_j(\rho', \theta'), \quad (6)$$

同理,轴外视场子孔径部分的面形误差可表示为

$$W(\rho, \theta) = \sum_{j=1}^{36} C_j Z_j(\rho, \theta), \quad (7)$$

由(5)~(7)式即可获得由全口径的面形误差系数 C'_j 表示的子孔径处的面形误差系数 C_j 。

$$W(\rho, \theta) = \sum_{j=1}^{36} C_j Z_j(\rho, \theta) = \sum_{j=1}^{36} C'_j \mathbf{M}(B, H_x, H_y, H) Z'_j(\rho', \theta'), \quad (8)$$

$$C_j = C'_j \mathbf{M}(B, H_x, H_y, H). \quad (9)$$

考虑元件面形误差为球差(Z_{sphere}, Z_9)、彗差($Z_{\text{coma}}, Z_7/Z_8$)、像散($Z_{\text{astig}}, Z_5/Z_6$)时的情况,因此取 Fringe Zernike 多项式 5~9 项可得

$$C_{5\sim 9} = C'_{5\sim 9} \mathbf{M}(B, H_x, H_y, H), \quad (10)$$

式中 $\mathbf{M}(B, H_x, H_y, H)$ 为全口径到子孔径的面形误

差变换矩阵,表示为

$$M(B, H_x, H_y, H) = \begin{bmatrix} B^2 & 0 & 3B^2 H_x & -3B^2 H_y & 12B^2 (H_x^2 - H_y^2) \\ 0 & B^2 & 3B^2 H_y & 3B^2 H_x & 24B^2 H_x H_y \\ 0 & 0 & B^3 & 0 & 8B^3 H_x \\ 0 & 0 & 0 & B^3 & 8B^3 H_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B^4 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

将系统中不同反射镜不同视场的子孔径部分面形误差系数带入(3)式叠加即可获得系统各视场波像差系数。对于同一反射镜,各个视场内孔径压缩比因子 B 为常数(未考虑渐晕),相对偏心量因子 H 表示不同视场的主光线在此表面的相对投影高度,可以通过光学设计软件追迹不同视场的主光线和边缘光线获得上述两个参数。

2.2 模型分析

通过分析变换矩阵可得:1)当反射镜面作为系统的孔径光阑(出瞳或入瞳)时,所有视场内的孔径压缩比因子 $B=1$,相对偏心量因子 $H=0$ 。这表示如果作为系统孔径光阑的反射镜存在面形误差时,

在所有视场内引入的波像差系数为常数。2)反射镜面不是系统的孔径光阑时,高阶面形误差系数不但在所有视场内引入比例变化后的同阶波像差系数,而且还将在轴外视场引入较低阶的波像差系数,且不同的波像差系数与视场的依据关系不同。例如反射镜表面存在球差时,除在所有视场内引入球差(Z_9)外,还将引入彗差(Z_7/Z_8)和像散(Z_5/Z_6)。引入的彗差随着视场的增加线性增加,引入的像散随着视场增加成平方关系增加[图 2(a)]。当反射镜表面存在彗差时,引入的像散随着视场的增加线性增加[图 2(b)]。

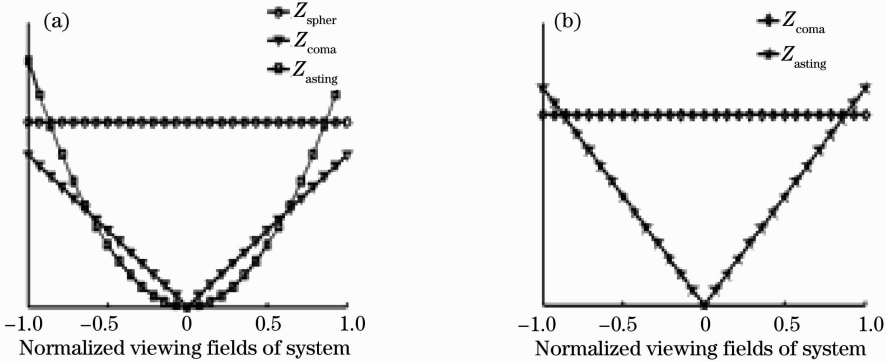


图 2 面形误差引入像差与视场关系。(a)球差引入彗差、像散;(b)彗差引入像散

Fig. 2 Mirror figure error induced aberration vary with viewing field. (a) Spherical-aberration-induced coma and astigmatism; (b) coma-induced astigmatism

3 面形误差对系统像差特性验证

由于 TMA 系统(图 3)在设计时像差已获得了良好的校正,成像质量接近衍射极限,可以认为 TMA 系统的设计剩余像差为零。利用干涉仪数据分析软件 MetroPro 模拟产生面形误差数据,并将模拟产生的面形数据带入到光学设计软件 CODE V 中进行分析。

3.1 孔径光阑(主镜)引入面形误差

将图 4(a)所示的面形数据带入到 CODE V 中的 TMA 系统主镜(STOP)上,通过变换矩阵分析可知,将会在光学系统全视场内引入常数量的像散

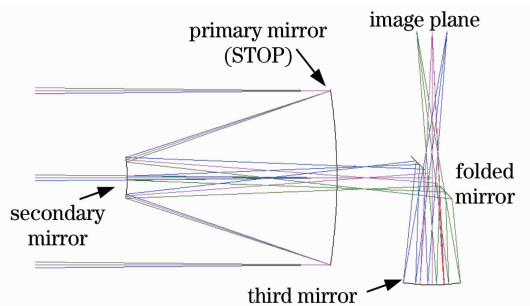


图 3 TMA 系统示意图

Fig. 3 Diagram of TMA system

(Z_{astig})、彗差(Z_{coma})、球差(Z_{spher})。利用 CODE V 的像差全视场显示(full-field-display)功能得到的像散[图 4(b)]、彗差[图 4(c)]、球差[图 4(d)]在全视场内为的方向和量值均为常量,证明了变换矩阵的正确性。

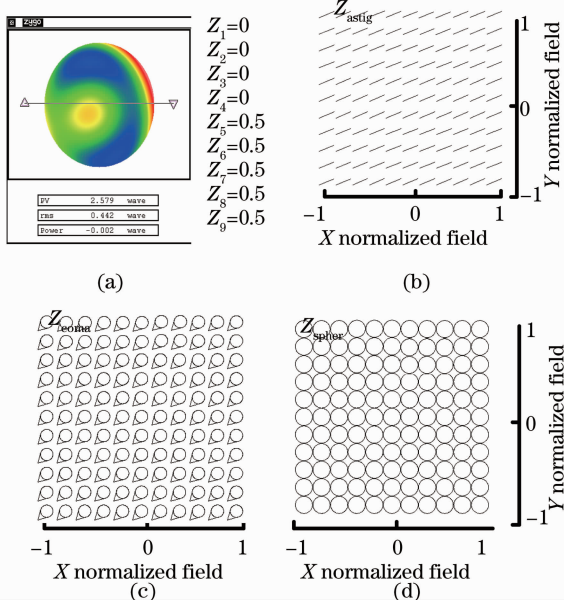


图 4 (a)主镜面形误差及(b)~(d)其引入的像差全视场显示

Fig. 4 (a) Surface profile error of primary mirror and (b)~(d) it's full- viewing-field display of induced aberration

3.2 非孔径光阑引入面形误差

利用干涉仪数据分析软件 MetroPro 产生面形球差($Z_9 = 0.5$)数据并将其带入 TMA 系统三镜。由(10)式可知球差(Z_9)产生的彗差及其像散为

$$\begin{cases} Z_{astig} \begin{cases} Z_5 = 12B^2(H_x^2 - H_y^2)Z_9 \\ Z_6 = 24B^2H_xH_yZ_9 \end{cases} \\ Z_{coma} \begin{cases} Z_7 = 8B^3H_xZ_9 \\ Z_8 = 8B^3H_yZ_9 \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

H_x/H_y 是与视场相关的线性因子,同一光学表面的孔径压缩比因子 B 为常数。由于中心视场的 H_x/H_y 为零,因此面形球差产生的彗差、像散的零点在中心视场。随着视场的增加,球差产生的彗差(H_x/H_y)线性增加,且彗差量值关于中心视场对称(图 5),球差产生的像散成二次项($H_xH_y/H_x^2 - H_y^2$)增加,像散量值关于中心视场对称分布(图 6)。

将面形彗差($Z_7 = Z_8 = 0.5$)代入 TMA 系统三镜,由(10)式可知彗差(Z_7/Z_8)产生的像散为

$$\begin{cases} Z_{astig} \begin{cases} Z_5 = 3B^2H_xZ_7 - 3B^2H_yZ_8 \\ Z_6 = 3B^2H_yZ_7 + 3B^2H_xZ_8 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

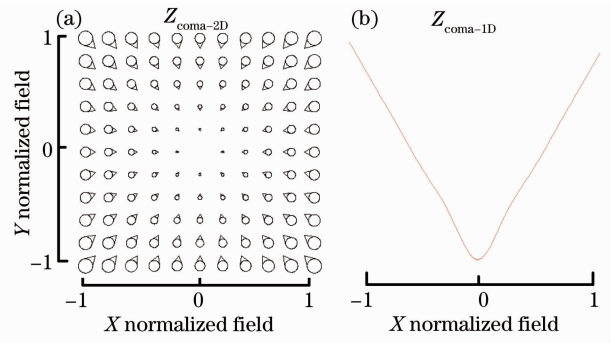


图 5 三镜面形球差产生线性彗差。(a)全视场显示; (b)一维显示

Fig. 5 Spherical aberration of third mirror induced liner coma. (a) Full-field-display; (b) one-dimensional display

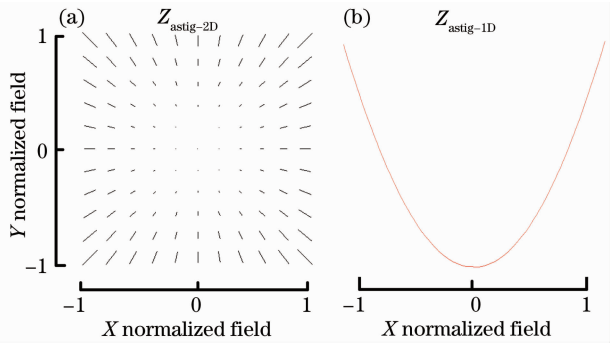


图 6 三镜面形球差产生二次像散。(a)全视场显示; (b)一维显示

Fig. 6 Spherical aberration of third mirror induced quadric astigmatism. (a) Full-field-display; (b) one-dimensional display

由于中心视场的 H_x/H_y 为零,因此面形彗差产生的像散值在中心视场为零。随着视场的增加,面形彗差产生的像散值线性增加并且关于中心视场对称(图 7)。

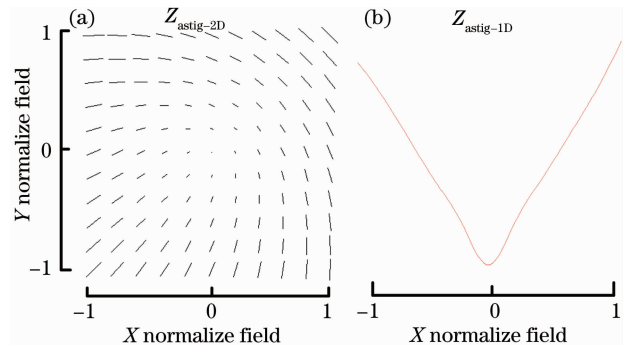


图 7 三镜面形彗差产生线性像散。(a)全视场显示; (b)一维显示

Fig. 7 Coma of third mirror induced liner astigmatism. (a) Full-field-display; (b) one-dimensional display

通过上述分析发现,当反射镜面存在高阶面形误差系数时将会产生低阶像差系数,且中心视场的低阶像差系数为零。面形球差产生的彗差和像散零点、面形彗差产生的像散零点均位于视场中心。这是因为在变换矩阵中高阶系数产生低阶系数时均与相对偏心量因子($H/H_x/H_y$)相关,而光学系统中任意表面中心视场的相对偏心因子均为零。因此,高阶面形误差产生的低阶像差的零点位于中心视场。

4 结 论

通过坐标变换的方法获得了大口径反射镜表面面形误差对系统初级像差特性的影响。通过分析可知:当作为系统孔径光阑(出瞳或入瞳)的反射镜存在面形误差时,在系统全视场内引入的波像差为常数;当存在面形误差的反射镜面不为系统的孔径光阑时,面形误差不但在系统全视场内产生常数项的波像差系数,而且还将引入低阶的波像差系数,低阶像差的零点均位于中心视场,不同低阶波像差系数与视场的依据关系不同。对于理解大口径反射镜面形误差对系统像差特性影响和大口径光学系统装调具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Research of the uncoaxial three mirror system with wide field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
郭永祥,李英才,梁天梅等.一种大视场离轴三反射光学系统研究[J].光学学报,2010,**30**(9):2680~2683
- 2 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin *et al.*. Design of new-style unobscured three-mirror optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1144~1147
郭永祥,李英才,吕保斌等.一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J].光学学报,2010,**30**(4):1144~1147

- 3 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
- 4 K. P. Thompson. Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: spherical aberration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2009, **26**(5): 1090~1100
- 5 K. P. Thompson, T. Schmid, J. P. Rolland. The misalignment induced aberrations of TMA telescopes [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(25): 20345~20353
- 6 J. R. Rogers. Techniques and tools for obtaining symmetrical performance from tilted-component systems [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7): 1776~1787
- 7 R. V. Shark, K. P. Thompson. Influence of alignment error of a telescope system on its aberration field [C]. *SPIE*, 1980, **251**: 146~153
- 8 T. Schmid, K. P. Thompson, J. P. Rolland. Alignment induced aberration fields of next generation telescopes [C]. *SPIE*, 2008, **7068**: 70680E
- 9 T. Schmid, K. P. Thompson, J. P. Rolland. Misalignment-induced nodal aberration fields in two-mirror astronomical telescopes [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(16): D131~D144
- 10 T. Schmid, K. P. Thompson, J. P. Rolland. A unique astigmatic nodal property in misaligned Ritchey-Chrétien telescopes with misalignment coma removed [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 5282~5288
- 11 T. Schmid, J. P. Rolland, A. Rakich *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
- 12 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong *et al.*. Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 08120041
王平,田伟,王汝冬等.旋转支撑法去除元件面形测量的加持误差[J].光学学报,2011,**31**(8):08120041
- 13 H. Kaneda, T. Nakagawa, K. Enya *et al.*. Optical testing activities for the SPICA telescope [C]. *SPIE*, 2010, **7731**: 77310V
- 14 Paul R. Yoder. Opto-Mechanical System Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang Transl.. Beijing: China Machine Press, 2008. 457~470, 511~523
Paul R. Yoder.光机系统设计[M].周海宪,程云芳译.北京:机械工业出版社,2008.457~470,511~523
- 15 K. P. Thompson Aberration Fields in Nonsymmetric Optical Systems [D]. America: University of Arizona, 1980

栏目编辑:韩峰