

利用失调量向量选择投影物镜小比例模型系统补偿量

赵 阳 王 平 赵 磊 刘春来 华洋洋 门树东

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 光刻投影物镜小比例模型光学系统镜片数量较多,用每个补偿量去补偿对应失调量的传统装调方法对其不适用。利用灵敏度矩阵,并对其进行奇异值分解,对分解后的失调量向量的数值与符号进行分析,确定各失调量之间的相关性,提出了系统补偿量的选择方法,该方法仅需要分析少量向量即能选择补偿量的最佳组合。编写宏模块进行大量仿真计算,验证了补偿量敏感度与相关性分析的正确性。物镜系统初装完成后,对系统进行了仿真预装调,以确保补偿方案的可行性。实验结果表明,补偿后系统波像差均方根(RMS)值由 70 nm 降低到 29.6 nm,优于技术指标要求,证明了提出的补偿量选择方法的正确性和有效性。

关键词 几何光学;复杂系统装调;补偿量选择;奇异值分解;失调量向量;补偿量相关性

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0822001

Selecting System Compensators for Small Scale Projected Objective Using Displaced Parameters Vector

Zhao Yang Wang Ping Zhao Lei Liu Chunlai Hua Yangyang Men Shudong

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract Because of the large number of the lenses in a small scale projected objective, it is unsuitable to use a traditional method that each compensator only compensates the corresponding misalignment. A sensitivity matrix is utilized to solve this problem. The sensitivity matrix is decomposed using singularly valuable decomposition method. The values and signs of displaced parameters vector are analyzed, and the correlations among each displaced parameter are obtained. A method of selecting a set of optimum combination of system compensators which only need to analyze a few displaced parameters vectors is proposed. The selected compensators are proved as correct by massive simulation calculations with the aiding of macro commands modes. After the original assembling, a pre-aligning procedure of optical system is carried out to ensure the feasibility of the aligning scheme. Test results show that the wave front errors root mean square (RMS) reduced to 29.6 nm from 70 nm after compensating, which is better than the requirements of the qualifications. The results prove the methods of selecting compensators are right and effective.

Key words geometric optics; complex system alignment; compensators selection; singularly valuable decomposition; displaced parameters vector; compensators correlation

OCIS codes 220.1000; 220.1140; 220.4610

1 引 言

近年来,随着极大规模集成电路制造设备在按照“摩尔定律”不断地推陈出新以及大口径天文望远镜的蓬勃发展,各国都争相开展对成像质量接近衍射极限(如大口径望远镜^[1-4])、甚至超衍射极限光学系统(如光刻投影物镜^[5-6])的关键技术攻关。而

光学系统的集成装配技术是其中的一项重要任务。对于大口径光学镜片而言,集成和装调的难度很大,必须借助于计算机辅助装调技术。目前文献报道的计算机辅助装调方法几乎都用于大口径反射式光学系统^[7-11],它们的共同特点是元件数量少,失调量的个数也不多,这里的失调量定义为各光学元件理

收稿日期: 2014-01-20; **收到修改稿日期**: 2014-03-25

基金项目: 国家重大科技专项 02 专项(2009ZX02005)

作者简介: 赵 阳(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计和计算机辅助装调方面的研究。

E-mail: juventus-xx@126.com

想位置与实际位置的偏差。例如结构形式较复杂的离轴三反光学系统^[12-15],由于主镜口径最大,装调难度最大,因此一般将其作为装调基准固定不动,失调量由次镜和三镜共 12 个参量组成,对于这些失调量,利用计算机辅助装调技术,可计算出补偿量值,而且补偿量值和失调量值很接近,自洽性和收敛性得到了很好的印证。

对于多元件透射式光学系统而言,如高 NA 光刻投影物镜,有数百个失调量,不可能逐一去补偿调节。选择哪些失调量作为补偿量,以及补偿量个数的确定方法就显得极其重要。如果所选补偿量之间具有较强的负相关性,那么必然需要较大的移动量才能补偿像差。然而,用于调节机构的压电陶瓷驱动器的调节行程与调节精度是一对矛盾参量,对于光刻级光学系统而言,必然追求极高的调节精度,因此须尽量减小补偿行程。为解决这一问题,本文将灵敏度矩阵数学模型进行奇异值分解(SVD),针对分解后的失调量向量,对其元素的数值与符号进行研究,并通过仿真计算表明,仅通过分析该向量,即

可在获得补偿量灵敏度的同时,得到补偿量之间的相关性信息,从而为补偿量的选择提供依据。以投影物镜小比例模型为研究对象,对所选择的 3 个补偿量,通过仿真验证所选补偿量的正确性,实际系统装调、补偿后波像差的复测结果表明,波像差[均方根值(RMS)]由初始装配的 70 nm 缩小到 29.6 nm,得到超衍射极限的成像质量。

2 投影物镜小比例模型光学系统

光刻投影物镜中,光学镜片、机械结构零件的加工、检测和装调难度都在目前光学工程所能达到的极限水平上。多数元件的装配误差都在微米量级,个别元件甚至小于 1 μm。由于没有装配投影物镜的经验,国外对光刻物镜的集成技术又是保密的。因此,在高 NA 光刻物镜制造之前,必须进行小比例物镜的装配实验^[16]。在成功进行第 1 轮验证的基础上,目前正开展第 2 轮物镜验证实验。其光学系统结构图和技术指标要求分别如图 1 和表 1 所示。

表 1 投影物镜小比例模型技术指标要求

Table 1 Qualifications of small scale projected objective

Qualification	Wave length	Focal length	Image NA	Index	Total length	Design wave front error (RMS)	Expect wave front error (RMS)
Value	632.8 nm	50 mm	0.5	1.457021	530 mm	3 nm	45 nm

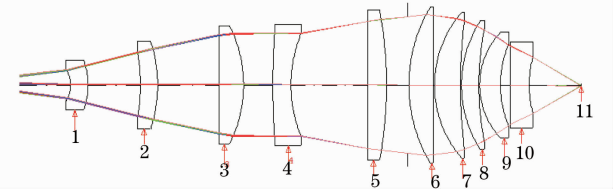


图 1 投影物镜小比例模型光学系统图

Fig. 1 Chart of small scale projected objective

与上一轮小比例模型相比,镜片数量由 7 片增加到 10 片,最大口径已经达到了 170 mm,其理论成像质量如图 2 所示,最大波像差(RMS)为 3 nm。

良好的光学设计结果只是物镜成功制造的必要

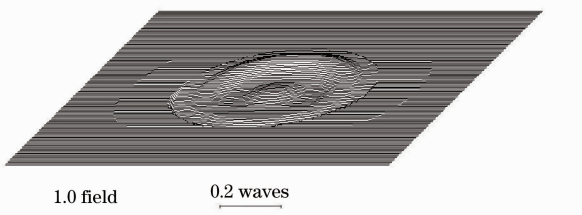


图 2 系统理论设计的成像质量结果

Fig. 2 Image qualities of the theoretically designed optical system

条件,物镜集成后的像质补偿方法至关重要。物镜像质补偿流程如图 3 所示,物镜集成后需检测各视场系统波像差,根据波像差检测结果计算各补偿参数的补偿量值,由驱动器完成补偿镜片的移动,并复测系统波像差,如果补偿后成像质量满足要求,则完成物镜像质补偿,否则需要反复迭代直到波像差收敛至指标需求。

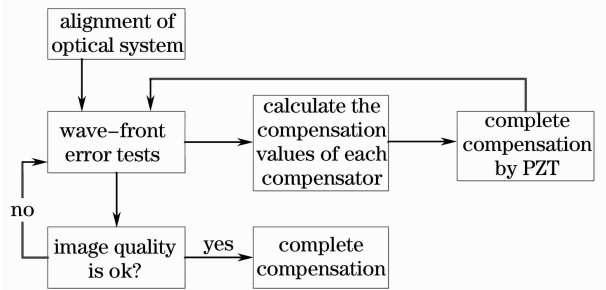


图 3 物镜像质补偿流程

Fig. 3 Flow chart of wave-front error compensation

3 灵敏度矩阵与 SVD 分解

基于计算机辅助装调技术,光学系统补偿量的

选择先要建立数学模型,确定光学系统的灵敏度矩阵^[17-19],它是确定补偿参量的基础。

求解光学系统失调量(补偿量)的数学模型可表示为

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{x} = \Delta\mathbf{F}, \quad (1)$$

式中

$$\Delta\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Delta\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\Delta\mathbf{x}$ 为失调量, $\Delta\mathbf{F}$ 为光学系统波像差的实测值与设计值之差,通常由 Zernike 多项式拟合得到简化的数学表达式, \mathbf{A} 为灵敏度矩阵,表示光学系统的波像差和失调量的敏感程度。

为了进一步明确失调量及其对 Zernike 项的影响,常用的方法为对矩阵 \mathbf{A} 进行 SVD 分解,得到 3 个矩阵乘积的形式,如(5)式所示:

表 2 光学系统公差分配表

Table 2 Tolerance distributions of optical system

Tolerance	Index errors	Wavefront errors	Radius errors	Thickness errors	Wedge errors	Decenter errors	Tip/tilt errors
Max value	5×10^{-6}	0.1 λ PV	3 fringe	0.03 mm	25"	0.02 mm	30"

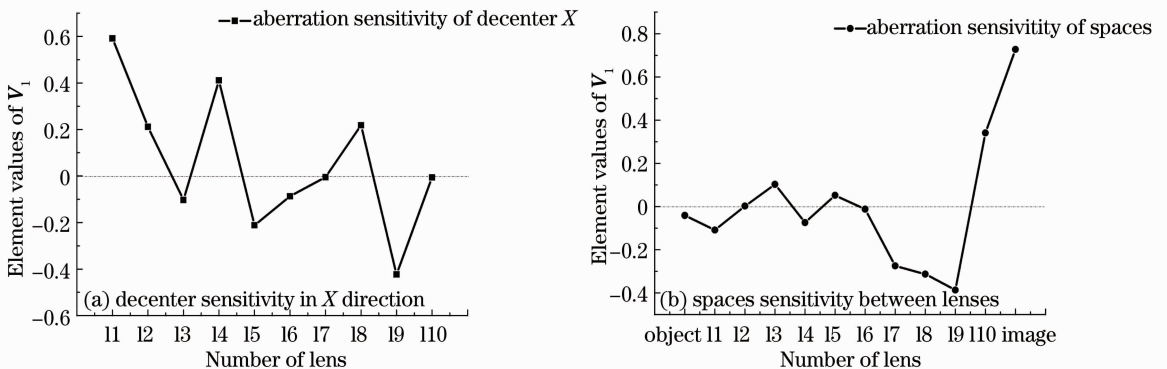


图 4 各元件偏心/间隔灵敏度分布

Fig. 4 Distributions of decenter/space sensitivities of each lens

4 补偿量相关性分析

根据图 4(a)、(b)对失调量的敏感性排序,如

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^{-1}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 分别为正交矩阵,分别称为像差向量和失调量向量, \mathbf{S} 为对角阵^[18]。

表 2 列出了物镜公差分配值,考虑到光学系统的旋转对称性以及小失调量的偏心与倾斜的近似等价性,因此,对于径向失调量,本文只分析 X 方向的偏心。为保证计算补偿量值的准确性,失调量 $\Delta\mathbf{x}$ 要大于表 2 中的公差值。 $\Delta\mathbf{x}$ 取值为:偏心 0.1 mm,间隔 0.1 mm。将 $\Delta\mathbf{x}$ 代入到光学仿真软件中,得到失调后的 36 项 FringeZernike 多项式。经分析,调节机构主要补偿初级像差,因此只取 Zernike 多项式前 9 项。由于轴向失调引起的像差远大于偏心失调,如果用一个灵敏度矩阵表示,则偏心引起的像差受轴向大像差值的影响而变得很不明显,分析较为困难,因此需要分别研究,故得到偏心 and 轴向两个灵敏度矩阵 \mathbf{B} 和 \mathbf{B}' 。

以偏心灵敏度矩阵 \mathbf{B} 为例,利用(5)式,将其进行 SVD 分解,其中对角阵元素 S_{11} 、 S_{22} 和 S_{33} 的值分别为 7.1、0.53 和 0.01,各相差一个数量级。 S_{ii} 即奇异值,可看成是灵敏度权重值。可知第一个失调向量 \mathbf{V}_1 对系统像差最敏感,该向量元素值如图 4(a)所示。同理得到镜片间隔灵敏度如图 4(b)所示。

表 3 所示,该排列次序与 Codev 公差分析中的排序完全一致。其中,离焦补偿灵敏度最高,用 Zygo 干

涉仪测量波像差时,为得到零条纹,实际已经实现了离焦补偿。在光刻机工作时产生的热像差需要进行轴向补偿,而此时像面已经固定,因此还需额外设置一个 Z 向补偿量。此外,还至少需要两个偏心补偿机构去分别平衡非对称像差中的初级彗差和像散。

表 3 各失调量灵敏度排序

Table 3 Orders of misalignments according to sensitivities

Order number	Decenter misalignments	Space misalignments
1	L1	Image
2	L9	L10
3	L4	L9
4	L8	L8
5	L2	L7

基于敏感度选择补偿量的原则,从表 3 中选用的补偿量应为偏心补偿 L1 和 L9,间隔补偿离焦和 L10。但是辅助装调仿真结果表明, X 向偏心补偿量很大, L1 和 L9 分别为 +0.17 mm 和 -0.09 mm, 而仅使用 L1 为补偿量时补偿量仅有 +0.045 mm, 但此时彗差与像散不能同时收敛。可见增加了一个补偿量, 补偿行程反而增大, 这显然是补偿量之间的耦合关系造成的, 如何在上述众多敏感补偿量中选择最合适的组合成为关键。因此有必要分析各补偿量之间的正负相关性。

既然 V_1 向量各元素的数值代表敏感度, 那么其符号是否代表相关性, 需要通过相关实验予以验证。将元件 5 的 Z 向移动量 +0.1 mm 作为失调量, 得到失调后的波像差, 再分别用 10 个元件和物、像面的 Z 向移动这 12 个量进行补偿, 各量补偿值如图 5 所示。

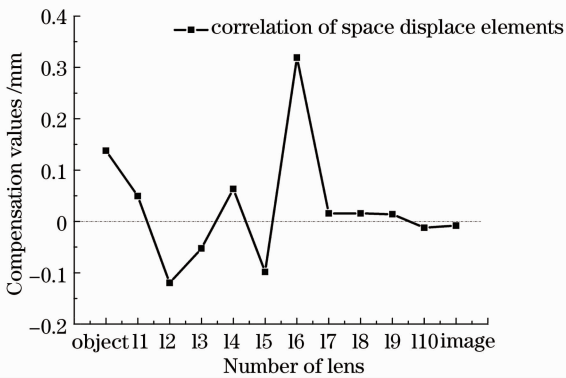


图 5 轴向补偿量的相关性

Fig. 5 Correlations of Z-axis compensators

由图 5 可知, 2#、3#、10# 镜片与像面这 4 个补偿量同 5# 镜片 Z 向移动方向相反, 说明它们与 5# 镜负相关。这一点与 V_1 向量元素的符号对应,

如图 4(b) 所示。此外, 5# 镜的补偿量与失调量数值相等, 符号相反, 验证了算法的正确性与自洽性。

为不失一般性, 再取 L3 的 X 向分别做相同的实验, 如图 6 所示。可知 L1 与 L9 的确存在负相关性, 导致了补偿量值的增加。

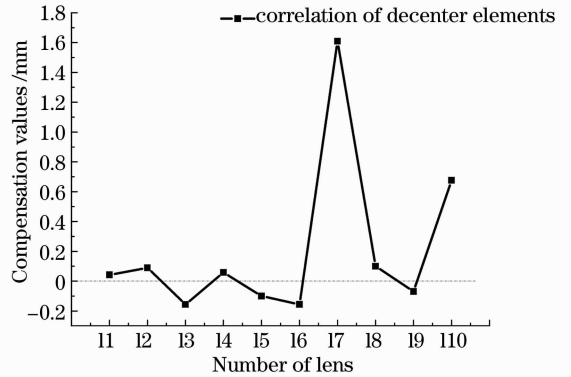


图 6 偏心补偿量的相关性

Fig. 6 Correlations of X-axis decenter compensators

以其他元件作为失调量的结果都与 V_1 各元素的符号相吻合。根据这种选择方法, 所选的 4 个补偿量为: 偏心补偿为 L1、L4, 轴向补偿为 L10、离焦。仿真结果为: 在得到相同波像差结果时, 两个 X 方向偏心补偿量分别为 +0.026 mm 和 +0.022 mm。仿真结果充分说明, 在奇异值相差悬殊的情况下(如相差一个数量级), 只需要通过 V_1 向量即可以很方便地完成补偿量的选择, 而且所需的补偿值很小, 得到了最优补偿量组合。

5 投影物镜装调实例

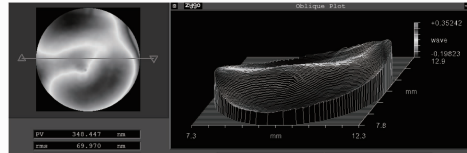
光刻物镜小比例模型实测镜片面形偏差 PV 值小于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8$ nm), 通过对隔圈的精修, 间隔公差小于 0.01 mm, 也满足要求。使用中心偏测量仪进行装配, 用 Zygo 干涉仪测量系统波像差, 检测结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 最大波像差约 70 nm (RMS), 将其分解得到的低阶 Fringe Zernike 多项式系数如表 4 所示。可知两个方向像散和 X 方向彗差较大, 需要进行偏心移动补偿调节。

将表 4 中的系数代入到(1)式中, 求得补偿量结果如下: 1# 镜 X 方向偏心 +0.054 mm, Y 方向偏心 +0.032 mm。4# 镜 X 方向偏心 +0.036 mm, Y 方向偏心 +0.044 mm。为验证计算结果的准确性, 将波像差与补偿量代入到 Codev 中仿真, 结果如图 8 所示, 最大波像差为 28.3 nm (RMS), 可以进行实际物镜装配。



(a)



(b)

图 7 用 Zygo 干涉仪测量系统波像差的结果。(a)测量装置；(b)测量结果

Fig. 7 Wave front error testing results by Zygo interferometer. (a) Test device; (b) test results

表 4 低阶 Fringe Zernike 多项式系数分布

Table 4 Coefficient distributions of low-order Fringe Zernike polynomial

Item	Z_5 (astig X)	Z_6 (astig Y)	Z_7 (coma X)	Z_8 (coma Y)	Z_0 (spherical)
Value / λ	0.16	0.115	0.11	-0.062	0.021

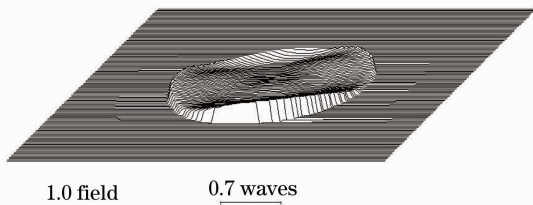


图 8 补偿后的成像质量仿真

Fig. 8 Image quality simulations after compensating

使用 PI 高精度驱动器，调节精度小于 $1 \mu\text{m}$ 。再次检测补偿后的波像差，如图 9 所示。系统最大波像差为 29.6 nm (RMS)，优于指标要求，并与仿真结果相符，初级像差得到补偿，残余像差主要为高阶的三叶像差，验证了这种补偿量选择方法是可行的。

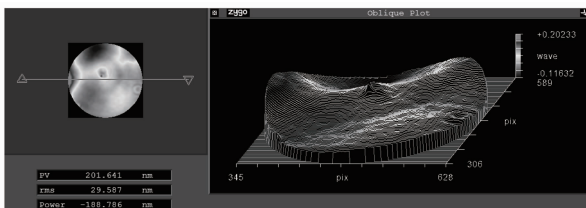


图 9 补偿后系统波像差检测结果

Fig. 9 Wave front error testing results after compensating

6 结 论

利用灵敏度矩阵及其 SVD 分解后的失调向量对投影物镜小比例模型光学系统的补偿量选择方法

进行了讨论，并完成了该系统的集成与像质补偿，通过对失调向量元素数值及符号的分析，只选择 3 个补偿机构便使补偿后的光学系统成像质量满足设计指标要求，减少了光学系统光机结构设计与系统装调的难度。这种装调方法能够为高 NA 光刻投影物镜光学系统的集成装调提供技术支持。

参 考 文 献

- 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.
- Sun Jingwei, Wang Jianli, Chen Tao, *et al.*. Alignment technology of the large alt-azimuth ground-base telescope main optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(3): 233-237.
- 孙敬伟, 王建立, 陈涛, 等. 地平式大口径地基望远镜主光学系统装调技术[J]. *激光与红外*, 2010, 40(3): 233-237.
- Zhang Xuemin, Han Juan, Duan Jiayou, *et al.*. Alignment method of coaxial eccentric-pupil three-mirror system [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0416003.
- 张学敏, 韩娟, 段嘉友, 等. 共轴偏光瞳折轴三反射光学系统装调方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0416003.
- Han Juan, Duan Jiayou, Chen Jianjun, *et al.*. An alignment of primary and secondary mirrors for optical system in large telescopic [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0716001.
- 韩娟, 段嘉友, 陈建军, 等. 大口径望远系统中主次镜系统的装调方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0716001.
- Chen Xingjun, Hu Song, Yao Hanmin, *et al.*. $0.1 \mu\text{m}$ node main lithography—193 nm (ArF) lithography [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2002, 31(1): 27-31.
- 陈兴俊, 胡松, 姚汉民, 等. $0.1 \mu\text{m}$ 线宽主流光刻设备——193 nm(ArF)准分子激光光刻 [J]. *电子工业专用设备*, 2002, 31(1): 27-31.

- 6 K R Castle, M C Ruda. Fabrication, alignment and test of an all-reflective, soft X-ray microlithography objective [C]. SPIE, 1993, 1996; 27-35.
- 7 Bin Wang, Shilei Jiang, Tian Qiu. Study on computer-aided alignment method of Cassegrain system [C]. SPIE, 2010, 7654; 765405.
- 8 J W Figoski. The Quick Bird telescope: The reality of large, high-quality, commercial space optics [C]. SPIE, 1999, 3779; 22-30.
- 9 M A Lundgren, W L Wolfe. Alignment of a three-mirror off-axis telescope by reverse optimization [J]. Opt Eng, 1991, 30(3); 307-311.
- 10 Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors [J]. Optical and Precision Engineering, 2010, 18(10); 2156-2163.
孙敬伟, 陈涛, 王建立, 等. 主次镜系统的计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10); 2156-2163.
- 11 T Schmid, K Thompson, J Rolland. Alignment induced aberration fields of next generation telescopes [C]. SPIE, 2008, 7068; 70680E.
- 12 Zhang Bin, Han 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.
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.
- 13 Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1); 115-120.
杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统[J]. 光学学报, 2004, 24(1); 115-120.
- 14 Chen Qinfang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Computer-aided alignment of off-axis aspheric mirrors in null testing [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(12); 2220-2223.
陈钦芳, 李英才, 马臻, 等. 离轴非球面反射镜补偿检验的计算机辅助装调技术研究[J]. 光子学报, 2010, 39(12); 2220-2223.
- 15 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. Optical and Precision Engineering, 2010, 18(8); 1754-1759.
巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8); 1754-1759.
- 16 Zhao Yang, Gong Yan. Computer aided alignment of small scale projected objective [J]. Chinese Optics, 2012, 5(4); 394-400.
赵阳, 巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学, 2012, 5(4); 394-400.
- 17 Jianfeng Liu, Funian Long, Wei Zhang. Study on computer-aided alignment method [C]. SPIE, 2005, 5638; 674-681.
- 18 Xue Xiaoguang, Li Guoxi, Gong Jingzhong, *et al.*. Assembly process oriented computer aided alignment technology of precision optical system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(10); 2163-2170.
薛晓光, 李国喜, 龚京忠, 等. 面向装配过程的精密光学系统计算机辅助装调技术[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10); 2163-2170.
- 19 Ho-Soon Yang, Sung-Hee Kim, Yun-Woo Lee, *et al.*. Computer aided alignment using Zernike coefficients [C]. SPIE, 2006, 6293; 62930I.

栏目编辑: 张浩佳