

文章编号 1004-924X(2013)12-3029-08

# 投影物镜小比率模型系统补偿量的选择

赵 阳\*, 巩 岩

(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:** 由于光刻投影物镜小比率模型光学系统的光学元件数量较多, 用每个补偿量去补偿对应失调量的传统装调方法已不适用。本文利用灵敏度矩阵, 通过找出偏心补偿量和倾斜补偿量的内在联系来缩小补偿量的选择范围。然后根据失调量敏感度的分析, 提出了选择系统补偿量的方法。利用这个方法, 选择 4 个补偿量便使补偿后的光学系统的成像质量满足设计指标要求, 减少了光学系统的装调难度。最后, 编写宏模块完成大量仿真计算, 验证了敏感度分析的正确性。光学系统初装完成后, 对系统进行了预装调。实验结果表明, 补偿后系统波像差(RMS)由 50.9 nm 提高到 25.9 nm, 优于技术指标要求, 证明了本文提出的补偿量选择方法的正确性和有效性。

**关键词:** 投影物镜; 复杂系统装调; 补偿量选择; 灵敏度矩阵; 宏模块

**中图分类号:** TN305.7; O435.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3029

## Selection of system compensators for small scale projected objective

ZHAO Yang\*, GONG Yan

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

\* Corresponding author, E-mail: juventus-xx@126.com

**Abstract:** As the small scale model optical system for a projected objective of lithography has so many optical elements, it is impossible to use a traditional method that each compensator only compensates the corresponding misalignment. Therefore, this paper proposes a sensitive matrix to solve this problem. Firstly, the internal relations between the decenter disalignments and the tip/tilt ones were found out based on a sensitive matrix to reduce the range of selection compensators. Then, according to the analysis of the disalignment sensitivity, a method for selecting system compensators was proposed. With the method, only selected four compensators could allow the imaging quality of compensated optical system to achieve the design index and the alignment difficulty to be reduced. Finally, the macro command modes were proposed to complete the massive simulation calculation to prove the correctness of the sensitive analysis. After the original assembling, a pre-aligning procedure of optical system was achieved to ensure the feasibility of the aligning scheme. The test results show that the wave front errors (RMS) have reduced to 25.9 nm from 50.9 nm after compensation, which is

收稿日期: 2012-08-09; 修订日期: 2012-10-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 40974110)

better than the requirements of qualifications. The results prove that the proposed methods are right and effective.

**Key words:** projected objective; complex system alignment; compensator selection; sensitivity matrix; macro command mode

## 1 引言

对于一般的光学系统而言,只要光-机系统设计合理,加工满足设计要求,装调方案可行,就能较容易达到像质要求。常规装调方法要求装调人员须具备丰富的实际操作经验,存在一定的盲目性,而且装调周期较长,精度不高。对于有超高精度要求、成像质量接近衍射极限的光学系统(如光刻投影物镜<sup>[1-3]</sup>、大口径望远镜<sup>[4-7]</sup>)而言,其光机结构的设计、加工、装调难度都很大,常规的装调方法无法满足像质要求,需要借助计算机辅助装调技术才能得到满足要求的光学系统。目前,文献报道的计算机辅助装调方法主要用于大口径反射式光学系统<sup>[8-12]</sup>,这类系统的光学元件数量较少,其理想位置与实际位置的偏差——失调量的个数也少。例如较复杂的离轴三反光学系统<sup>[13-15]</sup>,主镜作为装调基准固定不动,系统的失调量由次镜和三镜的 Z 向移动、XY 方向的偏心和倾斜等 11 个参量组成。针对每个失调量,利用计算机辅助装调技术可以得到相对应的补偿值。在失调量不大的情况下,补偿量和失调量非常接近,符号相反,表现出很好的收敛性和自治性。

对于复杂的透射式光学系统,例如光刻物镜,镜片数量近 30 片,失调量多达数百项,不可能逐一进行调节。即便是用于关键技术验证的投影物镜小比率模型光学系统,镜片数量为 7 片,失调量也达到了 35 项,逐一调节也是不实际的。因此选

择哪些失调量作为补偿量,以及确定补偿量个数就显得非常重要。本文利用灵敏度矩阵对投影物镜小比率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。通过波像差分析,只选择 4 个补偿量便使补偿后的光学系统成像质量满足设计指标要求,降低了光学系统的装调难度。

## 2 投影物镜小比率模型光学系统

光刻投影物镜要求具有极小像差的成像质量。光学镜片、机械结构零件的加工、装调和检测要求都是目前光学工程所能达到的极限水平<sup>[16-17]</sup>。多数元件的装调误差都在微米量级,个别元件甚至要小于  $1 \mu\text{m}$ 。由于没有装调经验,而

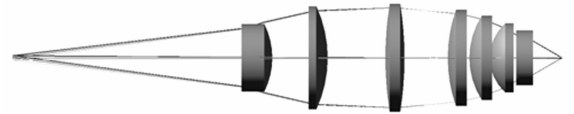


图 1 投影物镜小比率模型光学系统图

Fig. 1 Optical system of small scale projected objective

国外对光刻物镜的集成技术又是保密的,因此装调人员只能逐渐摸索出一套光刻物镜的集成方法,该方法在高 NA 光刻物镜制造之前,需要进行一轮甚至多轮的物镜验证试验。投影物镜小比率模型就是在这种情况下产生的,它的光学系统结构和技术指标要求分别如图 1 和表 1 所示。

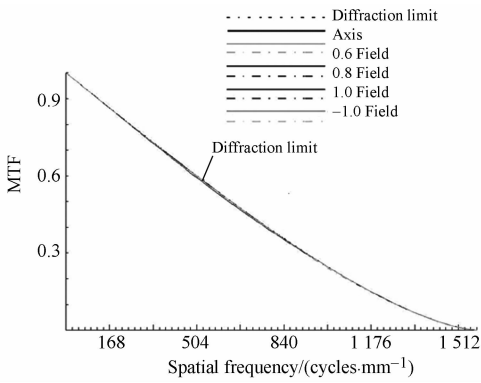
表 1 投影物镜小比率模型技术指标要求

Tab. 1 Qualifications of small scale projected objective

Qualifications	Wave length/nm	Focal length/nm	Image NA	Index	Total length/mm	Design wave front error (RMS)/nm	Expect wave front error (RMS)/nm
Values	632.8	30	0.5	1.457 021	220	10	40

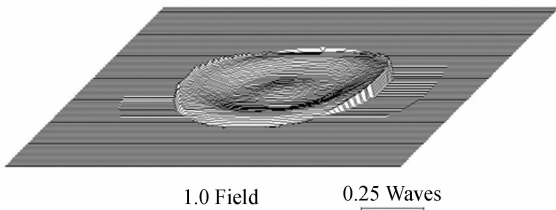
光学系统共由 7 片透镜组成,材料全部采用紫外熔融石英玻璃,其理论成像质量如图 2 所示。

从 MTF 曲线可知,系统达到衍射极限,最大波像差为 10 nm RMS。



(a) MTF 曲线

(a) Curves of MTF



(b) 系统最大波像差

(b) Max wavefront error of system

图 2 系统理论设计结果成像质量

Fig. 2 Image qualities of theoretical designed optical system

### 3 灵敏度矩阵

光学系统补偿量的选择首先要建立数学模型,确定光学系统的灵敏度矩阵<sup>[18-20]</sup>。通过检测光学系统的波像差,用软件处理得到 36 项 Fringe Zernike 多项式系数;再利用灵敏度矩阵,计算出各补偿参量的调整方向和数值,用高精度促动器

调节补偿元件,使光学系统成像质量满足设计指标要求<sup>[21]</sup>。由此可见,灵敏度矩阵是基础。

求解光学系统失调量(补偿量)的数学模型可表示为:

$$A\Delta X = \Delta F, \tag{1}$$

其中:

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

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{bmatrix}, \tag{3}$$

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

式中: $\Delta X$  为失调量; $\Delta F$  为光学系统波像差的实测值与设计值之差; $A$  为灵敏度矩阵,它表示光学系统的波像差和失调量的敏感程度。

根据光学设计的公差分配要求,表 2 给出了系统各项公差的最大值。计算灵敏度矩阵时失调量要大于最大公差值,以保证利用灵敏度矩阵计算补偿量值的准确性。失调量取值如下:间隔/厚度取 0.1 mm、偏心取 0.02 mm、倾斜取 1'。将  $\Delta X$  输入到软件中得到失调后的波像差,将波像差用 36 项 Fringe Zernike 多项式表示,其中由不同失调量引起的全视场的 Zernike 多项式系数分布如图 3 所示。图中去掉了前 4 项,它们主要体现了被测件的摆放位置误差和离焦量,不能反映系统的真实波面性质。

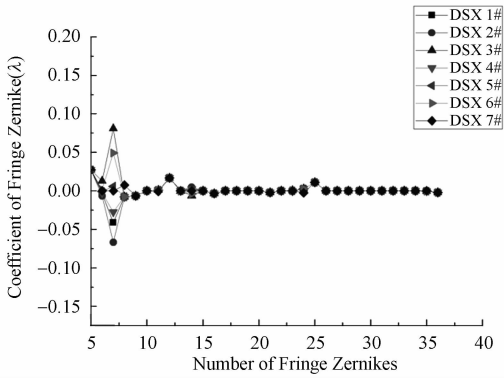
表 2 光学系统公差分配表

Tab. 2 Tolerance distribution of optical system

Tolerances	Index error	Wavefront error	Radius error	Thickness error	Wedge error	Decenter error	Tip/Tilt error
Max values	$5 \times 10^{-6}$	0.1λ (PV)	0.2 mm	0.1 mm	25"	0.02 mm	60"

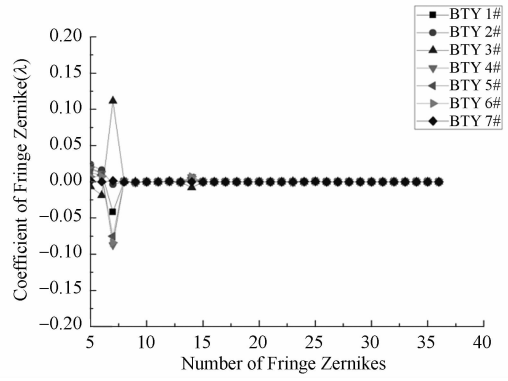
由图 3 可知,由失调量导致的像质劣化主要体现在 3 级像差,即 Zernike 系数的  $Z_5 \sim Z_9$  项。此外,由图 3(a)~(d)可知,DSX、DSY 分别与 BTX、BTY

有相近的灵敏度,而且 Tip/Tilt 的调节易引入额外的 Z 向移动,因此系统的非对称像差的补偿参量只在偏心失调量中选择,减小了补偿量的选择范围。



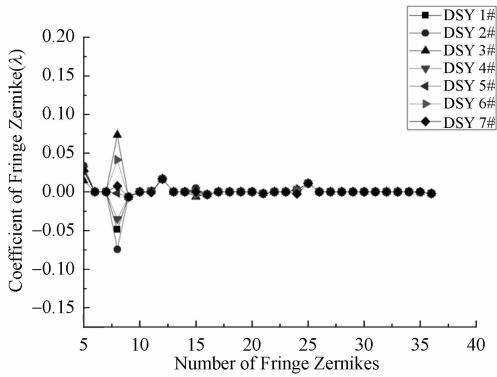
(a) X 方向偏心

(a) Decenter in X direction



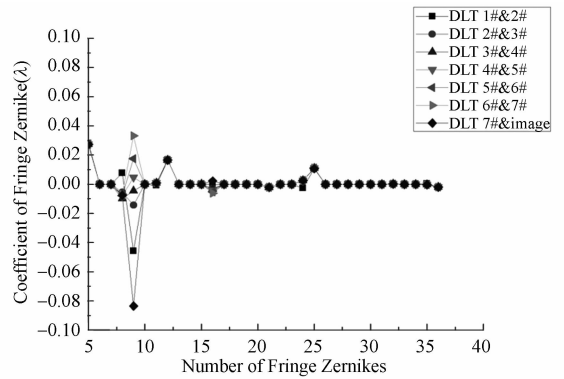
(d) Y 方向倾斜

(d) Tip/Tilt in Y direction



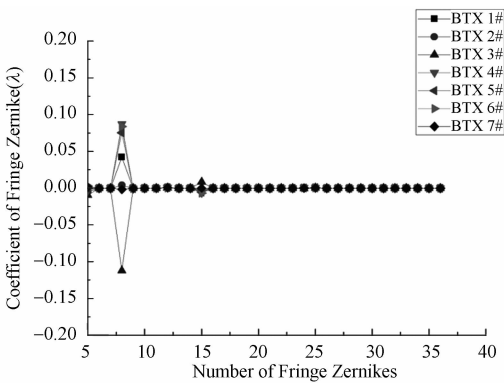
(b) Y 方向偏心

(b) Decenter in Y direction



(e) 镜片之间间隔

(e) Spaces between lenses



(c) X 方向倾斜

(c) Tip/Tilt in X direction

图 3 全视场波像差 Zernike 系数分布

Fig. 3 Distributions of Zernike coefficients for wave front errors in full field of view

#### 4 投影物镜小比率模型补偿量选择

根据图 3(a)、(b)、(e), 将失调量灵敏度排序, 如表 3 所示。离焦补偿量最灵敏, 也是最常使

表 3 各失调量敏感性排序

Tab. 3 Misalignment ordering according to sensitivities

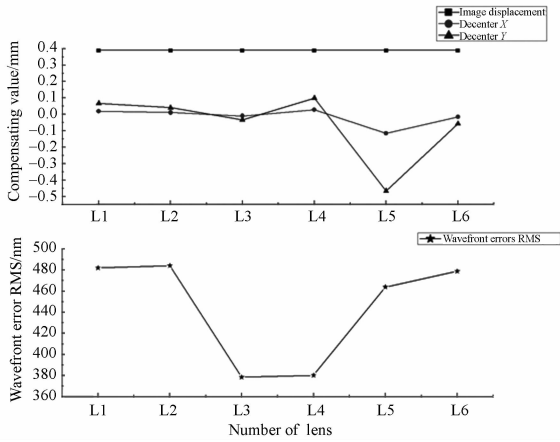
Order number	Misalignment	Aberration variation
1	DLT 7 # & Image	$Z_9 : 0.085\lambda$
2	DSX 3 #	$Z_7 : 0.080\lambda$
3	DSY 2 #, DSY 3 #	$Z_8 : 0.075\lambda$
4	DSX 2 #	$Z_7 : 0.070\lambda$
5	DSY 1 #	$Z_8 : 0.050\lambda$
	DSX 6 #	$Z_7 : 0.050\lambda$
6	DLT 1 #	$Z_9 : 0.045\lambda$

用的补偿量。在使用 ZYGO 干涉仪进行检测时,需要找到最佳焦面位置才能实现离焦补偿。此外,还需要一对偏心补偿量去平衡非对称像差。根据表 3, 3# 镜 XY 方向偏心最敏感。

本文通过仿真试验来验证已选择的 3 个补偿量是否满足系统像差的补偿要求。图 4(a) 表示离焦补偿和不同镜片作为偏心补偿量时,补偿量值和系统波像差的大小。当使用 3# 镜偏心作为补偿量时,系统波像差最小,补偿量也很小,验证了 3# 镜选择的正确性。此外,4# 镜也能得到较好的结果,但补偿值移动量较大,对于柔性机构而言增加了设计难度,因此优先选择 3# 镜。此时,系统的残余波像差为 482 nm,远不能满足要求,还需要再增加补偿量,这需要通过分析系统残余 Zernike 系数值来确定。由图 4(b) 可知,残余波像差主要是由球差( $Z_9$ )引起的,因此至少需要增

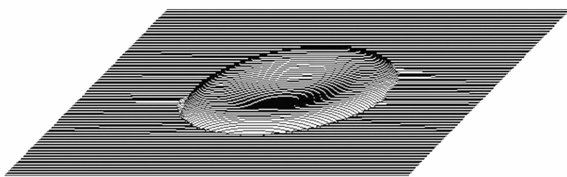
加一个轴向补偿量,根据表 3 可知优先选择 1# 镜。

本文列出了选取不同镜片进行轴向补偿时补偿移动量和系统波像差的大小,如图 5(a) 所示。由图可知,选择 1# 镜时,补偿后系统波像差最小,达到了 27 nm,满足设计指标要求,补偿移动量也在驱动器行程范围之内。此外,当使用 3# 或 5# 镜作为轴向补偿量时,波像差的计算结果是发散的,这与轴向补偿量与离焦量之间的相关性有关,该问题目前正在研究过程中。4 个补偿量补偿后系统的残余波像差如图 5(b) 所示,当继续增加轴向或偏心补偿量时,系统波像差没有再缩小,由此说明补偿迭代计算已经收敛。因此,该系统的补偿量选为:1# 镜 Z 向移动、像面 Z 向移动和 3# 镜 X, Y 方向偏心移动。但是,针对不同的系统,根据不同的指标要求,补偿量的个数也不相同,因此需要做大量的仿真计算。作者编辑了几个辅助宏程序,只需输入补偿量就能够自动计算并输出系统波像差值、补偿量移动量值,节省了大量时间。



(a) 3 个补偿量时的波像差和补偿值

(a) Wavefront errors and compensating values for three compensators



1.0 Field                      3 Waves

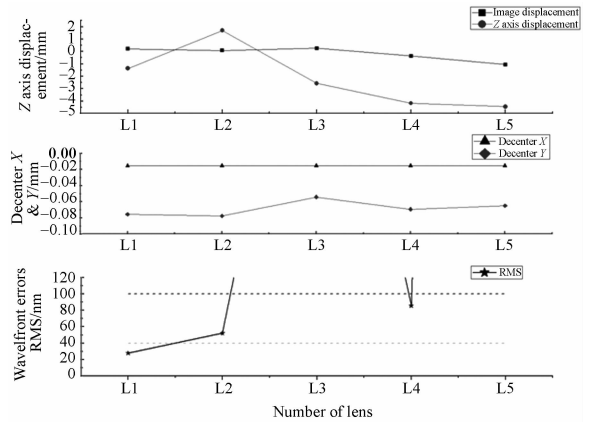
$Z_5 = -0.085\lambda$      $Z_6 = -0.022\lambda$      $Z_7 = -0.0428\lambda$   
 $Z_8 = 0.026\lambda$       $Z_9 = -0.384\lambda$

(b) 补偿后的系统波像差

(b) Wavefront errors after compensation

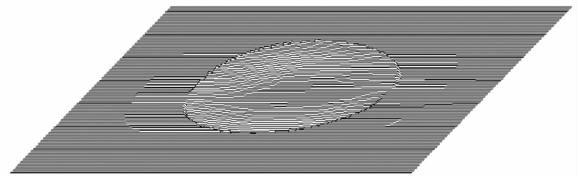
图 4 3 个补偿量的补偿结果

Fig. 4 Results for three compensators



(a) 4 个补偿量时的波像差和补偿值

(a) Wavefront errors and compensating values for four compensators



1.0 Field                      1.5 Waves

$Z_5 = -0.03\lambda$      $Z_6 = -0.061\lambda$      $Z_7 = -0.0031\lambda$   
 $Z_8 = 0.0466\lambda$      $Z_9 = -0.0129\lambda$

(b) 补偿后的系统波像差

(b) Wavefront errors after compensation

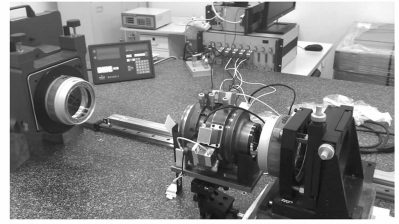
图 5 4 个补偿量的补偿结果

Fig. 5 Results for four compensators

### 5 投影物镜小比率模型光机结构装调

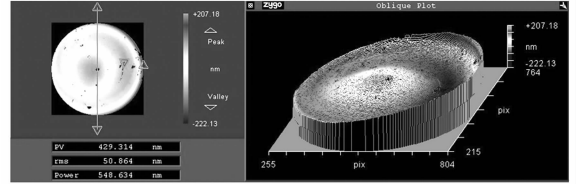
光刻物镜小比率模型的光学和机械零件加工完成后,实测镜片面形偏差小于  $\lambda/10$ (RMS)( $\lambda=632.8\text{ nm}$ );机械件经过精修后的最大加工误差为间隔公差  $0.1\text{ mm}$ ,满足公差要求。使用高精度激光定心工作台对该模型进行光机结构装调,仪器的定心精度达到亚微米级。用 ZYGO 干涉仪对其波像差进行检测,得到的检测结果如图 6 所示。

由图 6 可知,系统波像差为  $50.9\text{ nm}$  (RMS),不满足指标要求。Fringe Zernike 多项式系数如表 4 所示。由表可知, $Z_7$  项( $X$  方向三级彗差)和  $Z_9$  项(三级球差)较大,需要进行偏心和  $Z$  向移动补偿。



(a) 用 ZYGO 干涉仪检测系统波像差

(a) Wavefront error tested by ZYGO interferometer



(b) ZYGO 测量结果

(b) Testing results by ZYGO

图 6 用 ZYGO 干涉仪测量系统波像差及测量结果

Fig. 6 Wavefront error tested by ZYGO interferometer and its testing results

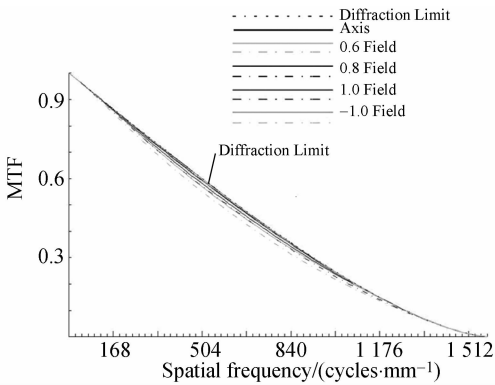
表 4 Fringe Zernike 系数分布

Tab. 4 Distribution of Fringe Zernike coefficients

Items	$Z_5$ (Astig X)	$Z_6$ (Astig Y)	$Z_7$ (Coma X)	$Z_8$ (Coma Y)	$Z_9$ (Spherical)
Values( $\lambda$ )	-0.013	0.003	0.137	0.020	0.142

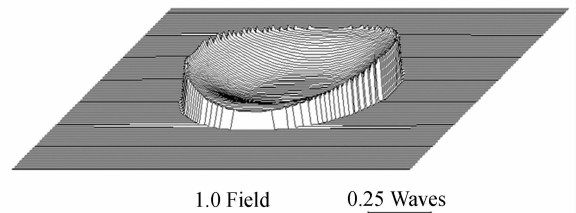
将所得的 Zernike 多项式系数代入到公式(1)中,求得的系统补偿量值结果如下:1# 镜轴向移动量为  $+0.184\text{ mm}$ ;3# 镜  $X$  方向偏心量为

$+0.03\text{ mm}$ , $Y$  方向偏心量为  $+0.012\text{ mm}$ 。其中, $X$  方向偏心补偿量相对于  $Y$  方向较大,这与表 4 中  $Z_7$  项较大的结果是一致的。为进一步验



(a) MTF 曲线

(a) Curves of MTF



(b) 系统最大波像差

(b) Max wavefront error of system

图 7 补偿后的光学系统成像质量

Fig. 7 Image qualities after compensation

证计算结果的可靠性,将补偿量代入到 CODEV 中仿真,补偿结果如图 7 所示。系统的最大波像差为 25.3 nm(RMS),满足指标要求。

采用 PI 高精度促动器调整后,用干涉仪再次检测补偿后的光学系统波像差,结果如图 8 所示。系统波像差达到 25.9 nm (RMS),优于指标要求,证明了这种系统补偿量选择方法的正确性和可行性。

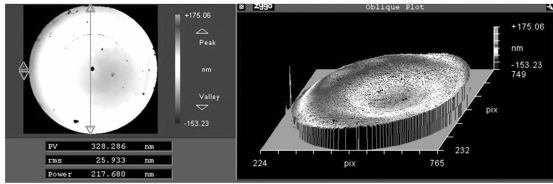


图 8 补偿后系统波像差检测结果

Fig. 8 Testing results of wavefront error after compensation

## 6 结 论

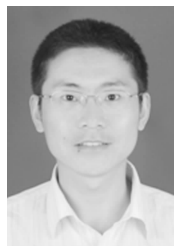
本文以投影物镜小比率模型为研究对象,通过建立灵敏度矩阵分析了偏心量和倾斜量之间的对应关系,仅在偏心失调量中选择非对称像差的补偿参量,缩小了补偿量的选择范围。将失调量按像差灵敏度的大小排序,通过分析系统波像差中存在的主要像差,编辑宏命令高效地完成了大量仿真运算,用以讨论补偿量个数、补偿参数移动量和像质补偿能力的关系,最终选择 4 个补偿量,并在软件中仿真验证了所选补偿量的正确性。实际系统装调时、补偿后波像差的复测结果表明,波像差(RMS)由原来的 50.9 nm 缩小到 25.9 nm,优于 40 nm 的技术指标要求。这种装调方法适用于由多个光学元件组成的复杂光学系统的集成装调,为高 NA 光刻投影物镜光学系统的集成装调提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 王丽萍. 极紫外投影光刻光学系统[J]. 中国光学, 2010,3(5):452-461.  
WANG L P. Optical system of extreme ultraviolet lithography[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2010,3(5):452-461. (in Chinese)
- [2] FLAGELLO D G, de KLERK J, DAVIES G, *et al.*. Towards a comprehensive control of full-field image quality in optical photolithography [J]. *SPIE*, 1997,3051:672-685.
- [3] 巩岩,张巍. 193 nm 光刻曝光系统的现状及发展[J]. 中国光学与应用光学,2008,1(1):25-35.  
GONG Y, ZHANG W. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008,1(1):25-35. (in Chinese)
- [4] 刘磊,李景林,吕清涛,等. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. 光学精密工程,2005,13:134-137.  
LIU L, LI J L, LÜ Q T, *et al.*. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13:134-137. (in Chinese)
- [5] 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.  
SUN J W, WANG J L, CHEN T, *et al.*. Align-
- ment technology of the large alt-azimuth ground-base telescope main optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2010,40(3):233-237. (in Chinese)
- [6] 李旭阳,李英才,马臻,等. 折轴三反射光学系统的计算机辅助装调技术研究[J]. 应用光学,2009,30(6):901-906.  
LI X Y, LI Y C, MA ZH, *et al.*. Computer-aided alignment method of coaxial three-mirror-anastigmat system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009,30(6):901-906. (in Chinese)
- [7] 苗健宇,张立平,翟岩,等. 三线阵 CCD 立体测绘相机的集成装调[J]. 中国光学,2012,5(4):366-372.  
MIAO J Y, ZHANG L P, ZHAI Y, *et al.*. Integrative assembly for three-line array CCD tridimensional mapping camera[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(4):366-372. (in Chinese)
- [8] 张庭成,王涌天,常军,等. 反射变焦系统的计算机辅助装调[J]. 光学学报,2010,30(6):1688-1692.  
ZHANG T CH, WANG Y T, CHANG J, *et al.*. Computer-aided alignment for reflective zoom systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010,30(6):1688-1692. (in Chinese)
- [9] LUNDGREN M A, WOLFE W L. Alignment of a three-mirror off-axis telescope by reverse optimization[J]. *Optical Engineering*, 1991,30(3):307-311.
- [10] 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.

- SUN J W, CHEN T, WANG J L, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2156-2163. (in Chinese)
- [11] 何红星, 赵劲松, 潘顺臣. 全反射式无焦 ZH 系统的装调[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1743-1749.
- HE H X, ZHAO J S, PAN SH CH. Optical alignment of all-reflective afocal ZH optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1743-1749. (in Chinese)
- [12] 孙敬伟, 陈涛, 王建立, 等. 全基于离焦星点图的 RC 式望远镜装调技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 728-736
- SUN J W, CHEN T, WANG J L, *et al.*. RC telescope alignment based on out-of-focus stellar image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 728-736. (in Chinese)
- [13] 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.
- CHEN Q F, LI Y C, MA ZH, *et al.*. Computer-aided alignment of off-axis aspheric mirrors in null testing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2220-2223. (in Chinese)
- [14] 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.
- GONG D, TIAN T Y, WANG H. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1754-1759. (in Chinese)
- [15] 朱时雨, 张新, 李威. 计算机辅助装调与传统基准传递技术相结合实现三镜消象散系统的装调[J]. *中国光学*, 2011, 4(6): 571-575.
- ZHU S Y, ZHANG X, LI W. Alignment of off-axis TMA system by combining computer-aided adjustment and traditional benchmark pass method [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 571-575. (in Chinese)
- [16] 倪明阳, 巩岩. 光刻投影物镜光学元件运动学支撑结构的设计与分析[J]. *中国光学*, 2012, 5(5): 476-484.
- NI M Y, GONG Y. Design and analysis of kinematic lens positioning structure in lithographic projection objective[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 476-484. (in Chinese)
- [17] 王平, 田伟, 王汝东, 等. 支撑应力对光刻透镜投射波前畸变的影响[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 57-63.
- WANG P, TIAN W, WANG R D, *et al.*. Influence of mounting stress on wavefront distortion of lithographic object lens[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 57-63. (in Chinese)
- [18] 车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(8): 1630-1634.
- CHE CH CH, LI Y C, FAN X W, *et al.*. Research on computer-aided alignment based on vector aberration theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1630-1634. (in Chinese)
- [19] LIU J F, LONG F N, ZHANG W. Study on computer-aided alignment method [J]. *SPIE*, 2005, 5638: 674-681.
- [20] 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.
- XUE X G, LI G X, GONG J ZH, *et al.*. Assembly process oriented computer aided alignment technology of precision optical system [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(10): 2163-2170. (in Chinese)
- [21] YANG H S, KIM S H, LEE Y W, *et al.*. Computer aided alignment using Zernike coefficients [J]. *SPIE*, 2006, 6293: 629301.

#### 作者简介:



赵 阳(1982—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究工作是光学系统设计和计算机辅助装调。E-mail: juventus-xx@126.com



巩 岩(1968—),男,吉林梅河口人,博士,研究员,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计、光机一体化设计及光机系统集成技术方面的研究。E-mail: ygong2000@sina.com