

# 投影光刻物镜的计算机辅助装调

赵菲菲<sup>1,2</sup> 唐剑宇<sup>3</sup> 黄 玮<sup>1</sup> 许伟才<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup> 常州市瑞得仪器有限公司, 江苏 常州 213000

**摘要** 针对投影光刻物镜苛刻的像质要求,将计算机辅助装调(CAA)技术引入投影光刻物镜的装调过程中,建立了相应的数学模型。选取33个视场Fringe Zernike多项式的4~37项,以及畸变作为校正对象,并选取19个结构参量作为补偿器。通过将CODE V的宏功能和Matlab结合,采集灵敏度矩阵和像质数据。提出用奇异值分解求加权最小二乘解的方法计算补偿量,通过权重因子实现对不同视场上不同Zernike项系数或畸变的改进。将补偿后光刻物镜的性能和理想光刻物镜对比,发现相比于设计镜头,装调后镜头的平均波前均方根(RMS)大约差0.004λ,平均畸变大约差1 nm,该方法可以将系统波像差和畸变恢复到接近设计水平。

**关键词** 光学设计;计算机辅助装调;投影光刻物镜;奇异值分解;畸变

**中图分类号** TP391.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0622001

## Computer-Aided Alignment for the Lithographic Lens

Zhao Feifei<sup>1,2</sup> Tang Jianyu<sup>3</sup> Huang Wei<sup>1</sup> Xu Weicai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Changzhou Rui De Instrument Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213000, China

**Abstract** Computer-aided alignment technology is introduced into the alignment of the lithographic lens and mathematical model is established for strict image quality requirements of lithographic lens. The 4th to 37th terms of fringe zernike polynomials and distortion are selected as corrected objects and 19 structural parameters are selected as compensators. The data of sensitivity matrix and image quality are acquired by combing macros of CODE V with Matlab. Singular value decomposition is proposed to calculate the weighted least-squares compensation amount. The Zernike coefficients or distortion of different field is improved by weight factor. The wavefront root mean square difference is about 0.004λ and the average distortion difference is about 1 nm between compensated objective and designed objective. The wavefront aberration and distortion are basically recovered to the design level.

**Key words** optical design; computer-aided alignment; lithographic lens; singular value decomposition; distortion

**OCIS codes** 220.1000; 220.3740; 220.4610; 220.3620; 080.2208

## 1 引 言

集成电路的硬件基础是各类用途的专用装备,其中制造难度最大的是光刻机中的投影光刻物镜。为缩小我国同国外的差距,满足工业化需求,长春光机所开展了光刻物镜的研究<sup>[1]</sup>。

光刻物镜对像质要求极其苛刻,使用传统装调方

法难以满足其像质要求,而计算机辅助装调(CAA)<sup>[2-3]</sup>可以很好地解决了传统装调方法不定量、随机成分多的缺点。它将计算机技术引入到装调中,具体的实现过程为:1)测量待测系统性能;2)将测量结果输入到装调软件或程序中,求解数学模型,得到各结构参量的调节量;3)定量调整各结构参量恢复到最佳位置。

收稿日期: 2013-12-12; 收到修改稿日期: 2014-01-15

基金项目: 国家重大专项基金(2009ZX02205)

作者简介: 赵菲菲(1989—),女,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: guangdianfeifei@126.com

导师简介: 黄 玮(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: huangw@ciomp.ac.cn

本文针对投影光刻物镜的特殊性能要求,引入计算机辅助装调技术来辅助装调投影光刻物镜,改进多个视场的4~37项 Zernike 系数和畸变大小。装调结果表明,此方法可以快速、准确地找到系统的失调量,校正失调量后,系统的性能接近于设计水平。

## 2 计算机辅助装调数学模型的建立

装配完成的系统各个元件实际位置与理想值之间的差值为失调量,失调量和光学系统性能之间可以近似为如下的线性函数关系<sup>[4]</sup>:

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

$$\text{式中 } \Delta\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix}, \quad \Delta\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta f_1 & \dots & \delta f_1 \\ \vdots & & \vdots \\ \delta f_m & \dots & \delta f_m \end{bmatrix}.$$

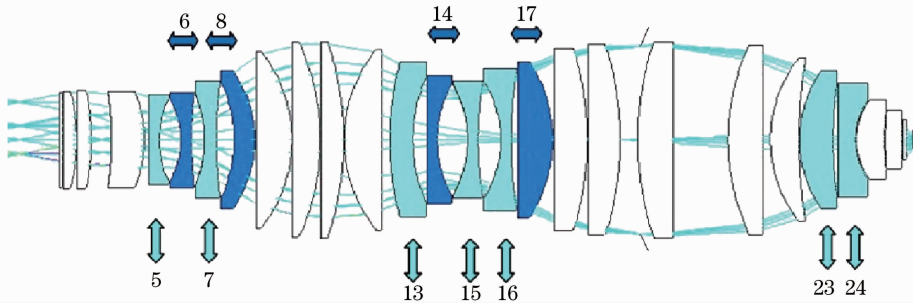


图1 投影光刻物镜结构示意图和补偿元件

Fig.1 Lithographic lens structure and compensators

一般的系统,只需选择低阶像差为装调的校正对象,而光刻物镜对系统性能要求极高,若只校正投影光刻物镜的初级像差,则装调结果将难以达到设计水平。评价光刻物镜的性能指标有很多,一方面,物镜为了得到高套刻精度,必须有很低的畸变;另一方面,光刻物镜几纳米到几十纳米数量级的波像差 RMS 要求,使得不仅需校正其初级像差,对高级像差也要完美校正。考虑到物镜为矩形视场,选择 33 个视场 Fringe Zernike 多项式<sup>[8,9]</sup>的 4~37 项(包括低阶与高阶波前像差),以及畸变作为校正对象。视场的分布如图 2 所示。

### 3.2 补偿器的选取

公差是系统实际参量对设计参量的偏离,调节补偿器能弥补公差造成的像质劣化。实际中,存在多种公差类型,通常按照产生来源将其分成材料特

$\mathbf{A}$  即灵敏度矩阵,一般用差商代替微商来求解灵敏度矩阵<sup>[5-6]</sup>, $\Delta\mathbf{X}$  为失调量, $\Delta\mathbf{F}$  为光学系统像质的实际测量值和理想值的差值。

另外,林婉媚<sup>[7]</sup>在开展对 CAA 机理的研究中发现光学元件的误差是可以相互补偿的,即当一个元件的装调有偏差且调节比较困难时,可以利用其他元件的结构参数来补偿。称可机械调节的元件结构参量为补偿器,称补偿器的调整量为补偿量。此时,求解失调量转化为求解补偿量。

## 3 数学模型中已知量的确定

### 3.1 校正对象的选取

校正对象一般是指高斯光学参数和光学系统的各种像质。讨论的光学系统是投影光刻物镜,系统结构如图 1 所示,系统静态视场为 26 mm×10.5 mm,各视场的平均波前均方根(RMS)为 0.005λ,平均畸变为 1.1 nm。

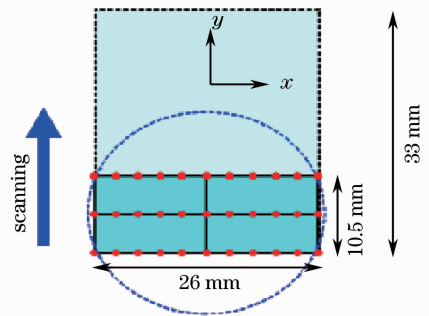


图2 计算机辅助装调的视场分布

Fig.2 Fields distribution of CAA

性公差,元件加工公差和元件装配公差。对于特定公差,补偿器数目愈多,装调后系统的像质就愈好,但对机械结构的要求就愈高。为减小复杂度,只对所有元件输入 6 类公差。输入的公差类型和对应公差幅值如表 1 所示。

表 1 输入公差类型和幅值  
Table 1 Input tolerance types and magnitude

| Tolerance type   | DLN                | DLF /fringes | DLT /mm | DLR /mm | DIS /mm | BTI /radians       |
|------------------|--------------------|--------------|---------|---------|---------|--------------------|
| Tolerance limits | $1 \times 10^{-5}$ | 0.5          | 0.002   | 0.002   | 0.001   | $5 \times 10^{-6}$ |

其中,DLN 代表折射率公差;DLF 和 DLR 代表曲率半径公差;DLT 代表厚度测量公差;DIS 能生成 DSX 和 DSY 公差,分别代表元件表面在 X 和 Y 方向的偏心;BTI 能生成 BTX 和 BTY 公差,分别代表元件表面相对于 X-Z 平面和 Y-Z 平面的倾斜公差。

传统光学系统所用的补偿方法主要是离焦和元件位置调整。像面离焦可以一定程度上补偿折射率、曲率半径和间隔引起的离焦。而元件位置调整能够补偿大部分低级像差和一定的高阶像差,其中沿光轴 Z 向移动可以补偿离焦和球差甚至轴外象散,而元件的偏心和倾斜则能补偿彗差和轴外像散。

考虑输入的公差和机械调节难度、机械设计成本,光学设计软件可以利用奇异值分解算法选择最有效的补偿器。所设计物镜选择偏心和间隔联合补偿的方式进行补偿。CODE V 软件最终选定第 5、7、13、15、16、23、24 个元件进行  $x$  和  $y$  两个方向的偏心补偿,第 6、8、14、17 个元件进行间隔补偿,再加上像面离焦,共 19 个补偿器。补偿器的示意图如图 1 所示,横向箭头表示间隔补偿,垂直箭头表示  $x$  和  $y$  向偏心补偿。

### 3.3 数学模型中已知量的获取

计算机辅助装调的数学模型为  $\mathbf{A}\Delta\mathbf{X}=\Delta\mathbf{F}$ 。其中, $\mathbf{A}$  为灵敏度矩阵,表示补偿器的单位改变量对系统像质的影响,此处单位大小选择为  $1 \mu\text{m}$ 。由上文可知,选择 33 个视场 Fringe Zernike 多项式的 4~37 项(包括低阶像差和高阶像差),以及畸变  $x$  和  $y$  向分量的大小作为校正对象。共选择 19 个补偿参

量。由此,得到大小为  $m$  行  $n$  列的灵敏度矩阵  $\mathbf{A}$ ,其中  $m=33 \times (34+2)=1188, n=19$ 。矩阵行的意义为各视场 Fringe Zernike 多项式各项系数或者  $x$  或  $y$  向畸变分量的改变量,矩阵列的意义为各补偿参量。图 3 为对灵敏度矩阵的描述。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \text{compensator1} & \dots & \text{compensator19} \\ \text{field1} \begin{cases} Z4 \\ \vdots \\ Z37 \\ D(x) \\ D(y) \end{cases} & \dots & \text{field1} \begin{cases} Z4 \\ \vdots \\ Z37 \\ D(x) \\ D(y) \end{cases} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \text{field33} \begin{cases} Z4 \\ \vdots \\ Z37 \\ D(x) \\ D(y) \end{cases} & \dots & \text{field33} \begin{cases} Z4 \\ \vdots \\ Z37 \\ D(x) \\ D(y) \end{cases} \end{bmatrix}$$

图 3 灵敏度矩阵  $\mathbf{A}$

Fig. 3 Sensitivity matrix  $\mathbf{A}$

当设计镜头一定时, $\mathbf{A}$  即确定,利用 CODE V 软件编写的宏命令预先采集并存储灵敏度矩阵。将设计镜头输入表 1 所示的公差,对公差进行随机扰动,用宏命令得到扰动前后物镜各视场像质  $F$  和  $F_0$ 。 $\Delta\mathbf{X}$  为待求解的补偿量。

### 3.4 数学模型准确性的验证

等间隔的移动设计镜头各补偿参量,观察 Fringe Zernike 多项式第 4 到 37 项的系数以及畸变大小的变化规律,绘制曲线如下。图 4(a)为  $x$  向物高  $-52 \text{ mm}$ ,  $y$  向物高  $-21 \text{ mm}$  视场上, FZernike 多项式第 9、14、19、24、29、34 项系数随第 13 片元件  $y$  向偏心的变化曲线;图 4(b)为  $x$  向物

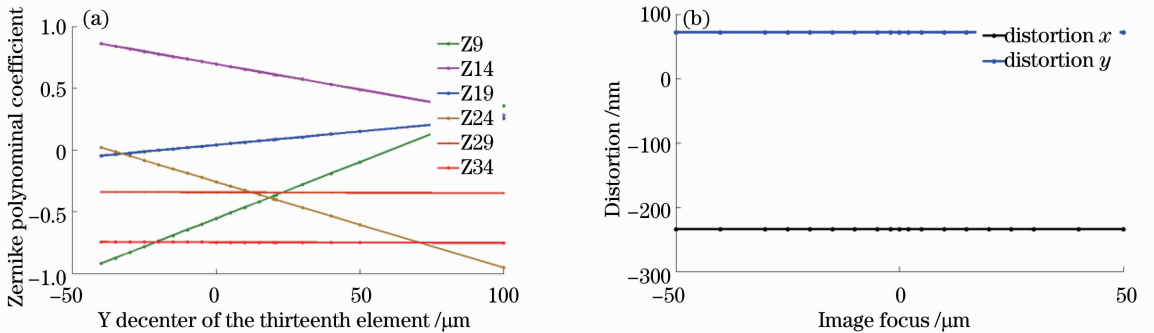


图 4 校正对象随补偿器的变化规律。(a) Fringe Zernike 多项式系数的变化;(b)  $x$  和  $y$  向畸变分量的变化  
Fig. 4 Variation of correction targets with compensators. (a) Coefficients variation of Fringe Zernike polynomials; (b) variation of  $x$  and  $y$  components distortion

高-20.8 mm,  $y$  向物高-21 mm 视场上, 畸变  $x$  和  $y$  向分量随像面离焦的变化曲线。

在其他视场上, Fringe Zernike 多项式系数和畸变随其他补偿器的变化有相似规律。从上边的曲线能够发现各视场 Zernike 各项系数和畸变随各补偿器的变化量有着极好的线性度。据此, 选择 Fringe Zernike 多项式系数和畸变作为校正对象, 且在此基础上, 通过线性替代非线性, 差商替代微商的两步近似构建的数学模型是完全可行的。

## 4 数学模型的求解

### 4.1 算法实现

方程  $\mathbf{A}\Delta\mathbf{X}=\Delta\mathbf{F}$  是一个超定方程组, 提出采用奇异值分解(SVD)求加权最小二乘解的方法计算补偿量, 利用权重因子来实现对不同视场上不同 Zernike 项系数或畸变的校正。此时矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\Delta\mathbf{F}$  的第  $i$  行数需同时乘以一个权重因子  $w_i$ , 根据装调的具体要求来分配不同视场上不同 Zernike 项数或畸变的权重  $w_i$ , 加权后的矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\Delta\mathbf{F}$  变为矩阵  $\mathbf{A}_1$  和  $\Delta\mathbf{F}_1$ , 计算机辅助装调的数学模型变为  $\mathbf{A}_1\Delta\mathbf{X}=\Delta\mathbf{F}_1$ 。其加权最小二乘解为  $\Delta\mathbf{X}=\mathbf{A}_1^+\Delta\mathbf{F}_1$ , 其中,  $\mathbf{A}_1^+$  为  $\mathbf{A}_1$  的 Moore-Penrose 广义逆。奇异值分解法能够快速、准确地求出矩阵  $\mathbf{A}_1$  的广义逆。在计算补偿量的过程中对所有 Zernike 项和畸变统一校正, 33

个视场权重因子全部选为 1。

对矩阵  $\mathbf{A}_1 \in R_{1188 \times 19}$  进行奇异值分解有:

$$\mathbf{A}_{1m \times n} = \mathbf{U}_{m \times m} \mathbf{S}_{m \times n} \mathbf{V}_{n \times n}^T, \quad (4)$$

这里,  $\mathbf{S}$  为  $m \times n$  的对角线矩阵, 对角元素为奇异值,  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  是正交矩阵, 并且  $\mathbf{U}^T = \mathbf{U}^{-1}$ ,  $\mathbf{V}^T = \mathbf{V}^{-1}$ 。

矩阵的奇异值一般下降得非常快。此时, 只需取前  $r$  大的奇异值来近似表示  $\mathbf{A}_1$ , 就能得到很高的近似度, 这即为矩阵  $\mathbf{A}_1$  的部分奇异值分解。下式为  $\mathbf{A}_1$  的部分奇异值分解表达式:

$$\mathbf{A}_{1m \times n} \approx \mathbf{U}_{m \times r} \mathbf{S}_{r \times r} \mathbf{V}_{r \times n}^T, \quad (5)$$

这是矩阵  $\mathbf{A}_1$  的近似表达式。  $r$  越大, 近似程度越高。对部分奇异值分解有:

$$\mathbf{A}_1^+ \approx \mathbf{V}_{n \times r} \mathbf{S}_{r \times r}^+ \mathbf{U}_{r \times m}^T. \quad (6)$$

相比于奇异值分解, 部分奇异值分解求得的补偿量一般会减小, 各补偿器的机械移动范围减小, 进而简化光机结构设计, 降低成本。

### 4.2 装调结果分析

图 5 为全部 19 个补偿器参与装调, 选取前  $r(r=0, 1, \dots, 20)$  大奇异值求失调量, 对随机扰动后的镜头进行补偿, 得到的系统各个视场的平均波前 RMS 值和平均畸变值。其中,  $r=0$  对应尚未补偿的随机扰动镜头,  $r=20$  对应设计镜头, (b) 为 (a) 的放大图, (d) 为 (c) 的放大图。

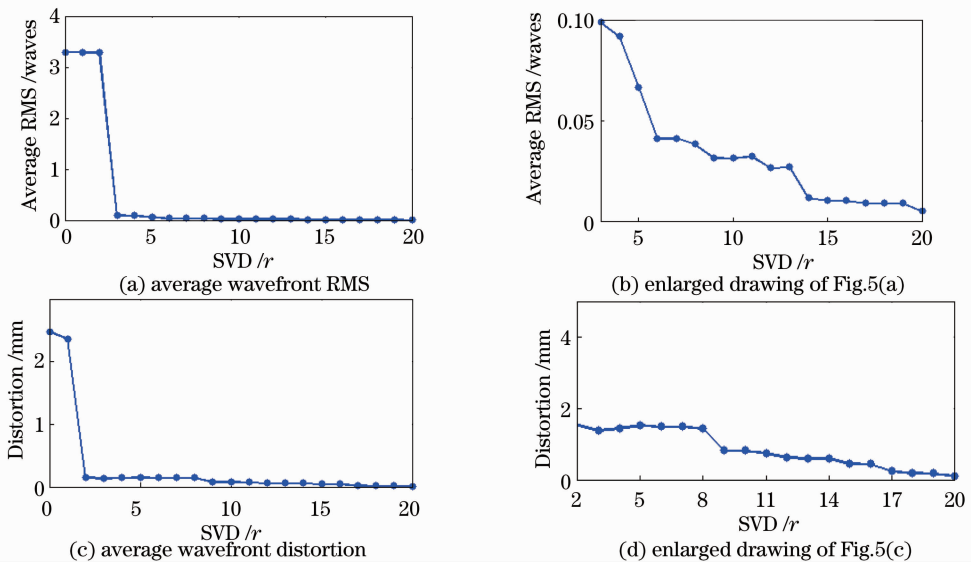


图 5  $r$  取不同值时, 补偿后各视场的平均波前 RMS 值和平均畸变值

Fig. 5 Average wavefront RMS and distortion of each field of compensated system with different  $r$  values

从图中可以看到  $r$  愈大, 补偿效果愈好, 并趋近于理论设计值。然而补偿效果提高最快的区间是前半部分, 随着  $r$  的增大, 曲线变化趋于平缓。

将扰动镜头、理想镜头和  $r$  取不同值时, 补偿后镜头的波前 RMS 值和各视场平均畸变值如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 设计镜头的波前 RMS 和

畸变分别为  $0.005\lambda$  和  $1.1\text{ nm}$ ；扰动后镜头的波前 RMS 和畸变分别为  $3.29\lambda$  和  $248\text{ nm}$ ； $r$  为 19 时，装调后镜头的波前 RMS 和畸变分别提高到了  $0.0088\lambda$  和  $1.9$ 。与扰动镜头相比，装调后镜头波前 RMS 和畸变分别提高了  $3.285\lambda$  和  $246.9\text{ nm}$ 。与设计镜头相比，装调后镜头波前 RMS 和畸变还分别差  $0.0033\lambda$  和  $0.8\text{ nm}$ ，基本可以将像质恢复到设

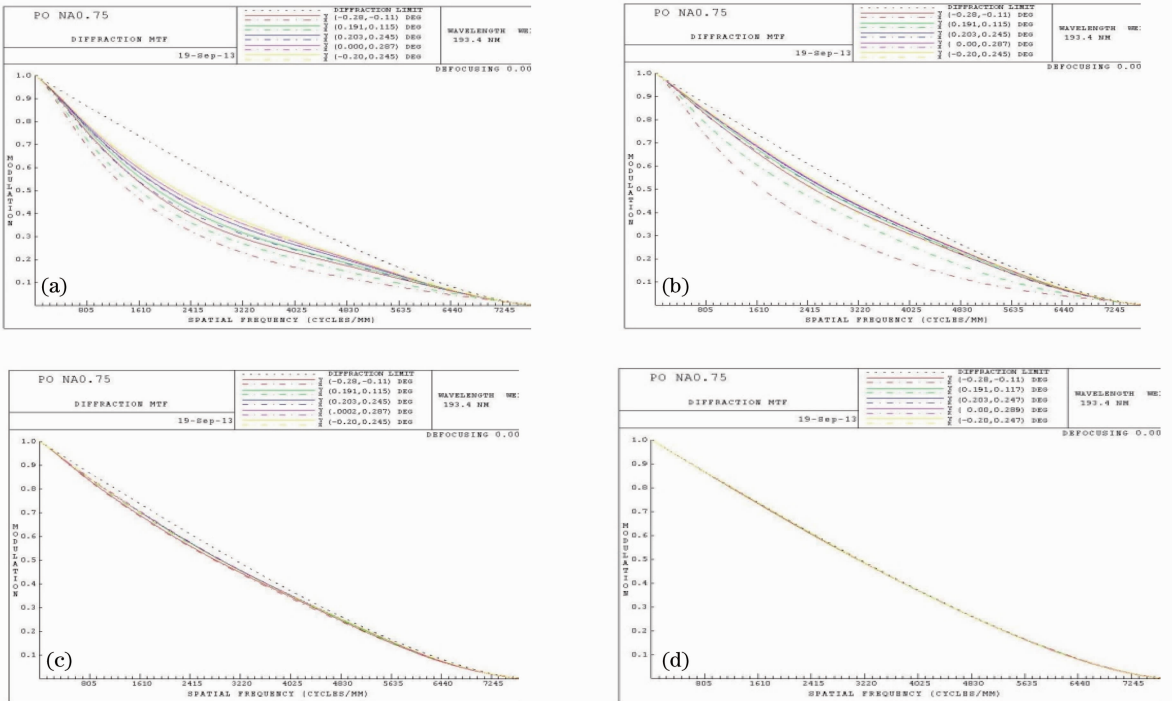
计水平。然而，距离设计水平还有一定的空间，还可以通过改进算法和加权重等方法进一步完善计算机辅助装调过程。

图 6 分别列出了  $r=3, 5, 8, 19$  时，对扰动镜头补偿后的调制传递函数(MTF)图像。从图中可以看出随着  $r$  的增大，MTF 在逐渐提高。

表 2 灵敏度矩阵前 36 行数据

Table 2 Data of line 1~36 of sensitivity matrix

| $r$                              | Disturbed lens | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9           | 10    |
|----------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|-------|
| Average $W_{\text{RMS}}/\lambda$ | 3.29           | 3.29   | 3.29   | 0.099  | 0.092  | 0.067  | 0.041  | 0.041  | 0.038  | 0.032       | 0.031 |
| Average distortion /nm           | 248            | 236    | 15     | 13.8   | 14.5   | 15.3   | 14.5   | 14.5   | 14.5   | 8.3         | 8.2   |
| $r$                              | 11             | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     | 19     | Design lens |       |
| Average $W_{\text{RMS}}/\lambda$ | 0.0324         | 0.0264 | 0.0269 | 0.0115 | 0.0102 | 0.0102 | 0.0089 | 0.0089 | 0.0088 | 0.0050      |       |
| Average distortion /nm           | 7.5            | 6.3    | 6.0    | 6.0    | 4.5    | 4.5    | 2.4    | 1.9    | 1.9    | 1.1         |       |

图 6  $r$  取不同值时，补偿后系统各个视场的 MTF。(a)  $r=3$ ；(b)  $r=5$ ；(c)  $r=8$ ；(d)  $r=19$ Fig. 6 MTF of each field of compensated system with different  $r$  values. (a)  $r=3$ ；(b)  $r=5$ ；(c)  $r=8$ ；(d)  $r=19$ 

## 5 结 论

结合投影光刻物镜的特殊像质要求，利用计算机辅助装调技术对其进行装调，建立了计算机辅助装调的数学模型。选取 33 个视场 Fringe Zernike 多项式的第 4 到 37 项(包括低阶和高阶波前像差)以及畸变  $x$  和  $y$  向分量的大小作为校正对象，并选取第 5、7、13、15、16、23、24 个元件作为  $x$  和  $y$  向的偏心补偿器，第 6、8、14、17 个元件作为间隔补偿器，再加上像面离焦补偿器，共 19 个补偿参量。通过

CODE V 的宏功能和 Matlab 软件结合，采集灵敏度矩阵、设计镜头像质和扰动镜头像质数据。提出用奇异值分解求最小二乘解的方法计算补偿量。装调后镜头的波前 RMS 和畸变分别达到了  $0.0088\lambda$  和  $1.9$ ，相比于设计镜头，波前 RMS 只相差约  $0.004\lambda$ ，畸变只相差约  $1\text{ nm}$ ，该方法可以将系统波像差和畸变恢复到接近设计水平，且可用于其他光学系统，具有较好的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Xu Weicai. Optical Design and Imaging Performance Compensation for the Lithographic Lens [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- 2 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.
- 3 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using zernike coefficients [J]. Optics 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.
- 4 Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun, *et al.*. Computer-aided alignment for reflective zoom systems [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1688-1692.  
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.
- 5 Kong Xiaohui, Fan Xuewu. Alignment of two-mirror aspherical optical system based on vector aberration theory [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, (8): 90-96.
- 6 Peng Yanglin, Dai Yifan, Xie Xuhui, *et al.*. Computer-aided alignment in null testing of large aspheric mirrors [J]. International Journal of Nanomanufacturing, 2013, 9(2): 194-200.
- 7 Lin Wumei. Study on computer aided assembling (CAA) mechanism of optical system [J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26(1): 49-52.  
林妩媚. 光学系统计算机辅助装调(CAA)机理的研究[J]. 光电工程, 1999, 26(1): 49-52.
- 8 H S Yang, S H Kim, Y W Lee, *et al.*. Computer aided alignment using Zernike coefficients [C]. Optics & Photonics International Society for Optics and Photonics, 2006: 62930I.
- 9 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.

栏目编辑: 韩 峰