第 5 卷 第 4 期
2012 年 8 月

中国光学
Chinese Optics

Vol. 5 No. 4
Aug. 2012

文章编号 1674-2915(2012)04-0394-07

投影物镜小比率模型的计算机辅助装调

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:针对小比率模型光学系统光学元件数量较多,无法用每个补偿量去补偿对应失调量的问题,提出利用计算机辅助装调方法,通过建立系统的灵敏度矩阵找出偏心失调量和倾斜失调量的内在联系来缩小补偿量的选择范围。根据失调量敏感度的分析,提出了只用 4 个补偿量补偿系统波像差的想法,并对所选补偿参量的补偿效果进行仿真,以此近一步验证想法的可行性。光学系统初装完成后,将实际测得的系统波像差以 36 项 Fringe Zernike 多项式的形式代入灵敏度矩阵,计算得到补偿参量的补偿值和移动方向,用驱动器实现像质补偿。实验结果表明:系统波像差(RMS)由50. 864 nm提高到 25. 993 nm,优于技术指标要求,证明了所选的 4 个补偿量的正确性和有效性。

关 键 词:计算机辅助装调;小像差光学系统;灵敏度矩阵;Fringe Zernike 多项式
中图分类号:O435. 2; TP391. 7 **文献标识码**:A doi:10. 3788/CO. 20120504. 0394

Computer aided alignment of 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: Due to the large numbers of lenses, it is impossible for the complex refractive system to use a compensator only to compensate the corresponding misalignment. Based on the aided alignment technology, this paper proposed a method to reduce the range of compensator selection by building a sensitivity matrix and finding the internal relations between decenter disalignments and tip/tilt ones. Then, a method by using only four compensators to compensate the whole optical system was proposed by analyzing the sensitivities of misalignments, and the feasibility of the selected compensators was proved by a simulation. After finishing assembling of the whole optical system, the tested wave front errors were induced into the sensitivity matrix in the form of

收稿日期:2012-03-21;**修订日期**:2012-06-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40974110)

36 items of Fringe Zernike polynomials to calculate the values and the moving directions of compensators driven by precision actuators. The test results show that the wave front errors(RMS) have reduced to 25.993 nm from 50.864 nm, which is better than the qualifications and proves that the selected four compensators are right and effective.

Key words: computer aided alignment; minimal aberration optical system; sensitivity matrix; Fringe Zernike polynomial

1　引　言

对于一般的光学系统,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。然而这种装调方法存在很大的盲目性,它要求装调人员具备丰富的实际操作经验,而且装调的周期较长,精度不是很高。对于有超高精度要求、成像质量接近衍射极限的光学系统(如光刻物镜[1-2]、大口径望远镜[3-5]),其光机结构设计、加工、装调难度都很大,常规的装调方法无法满足像质要求,需要借助于计算机辅助装调技术降低系统装调的难度,指导装调人员有针对性地对系统各种像差进行补偿,最终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[6-8],由于光学元件数量较少,其位置误差—失调量的个数也少。例如较复杂的离轴三反光学系统[9-10],它由主镜、次镜和三镜组成。主镜通常作为装调基准固定不动,整个系统的失调量由次镜和三镜的 Z 向移动、XY 方向的偏心和倾斜共11个参量组成。针对这些失调量,利用计算机辅助装调技术,可以得到相对应的补偿值,然后通过调节装置将失调元件调整到理论设计位置。计算结果表明:在失调量不大的情况下,补偿量值和失调量值相接近,符号相反,表现出很好的收敛性和自洽性。然而,对于复杂的透射式光学系统,例如光刻物镜,镜片数量多达二十几片,失调量个数多达数百项,不可能逐一去调节。即便是用于关键技术验证的光刻物镜小比率模型光学系统,镜片数量为7片,失调量个数也达到了35项,逐一调节失调量也是不实际的。

本文以光刻物镜小比率模型为研究对象,通过计算灵敏度矩阵,分析了偏心量和倾斜量之间的对应关系,有效减小了补偿参量的数量。根据失调量的灵敏度,从系统中选出4个补偿参量。通过测量系统波像差,分析出系统存在的主要像差,再经过迭代计算,得到相应补偿量值。然后,将得到的补偿值代入软件中进行仿真,验证补偿量计算结果的正确性。最后,调节补偿元件对系统进行像质补偿。复测结果表明,补偿后的系统波像差(RMS)由原来的50.864 nm缩小到25.933 nm,优于40 nm的技术指标要求。

2　计算机辅助装调数学模型

计算机辅助装调技术的应用首先要建立数学模型,确定光学系统的灵敏度矩阵,通过该矩阵找出对系统成像质量影响较大的失调量,将其选为补偿量[11-13]。通过检测光学系统波像差,利用软件对测得的波像差进行处理,得到36项Fringe Zernike多项式系数,再次利用灵敏度矩阵对其进行奇异值分解,计算出各补偿参量的调整方向和数值,用高精度驱动装置调节补偿参量,使光学系统成像质量满足设计指标要求[14]。由此可见,计算机辅助装调技术的基础是灵敏度矩阵。

在数学上,像差是失调量的函数[15]。光学系统的像差用 $F_j(j=1,2,\cdots\cdots,m)$ 表示,各失调量用 $x_i(i=1,2,\cdots\cdots,n)$ 表示,二者之间的函数关系表示为:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1,\cdots,x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1,\cdots,x_n) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中:$f_j(j=1,2,\cdots\cdots,m)$ 表示像差与光学元件失调位置之间的函数关系。由于实际问题十分复杂,无法找出函数$(f_1,f_2,\cdots\cdots,f_m)$的具体形式,因此把失调量与系统像质之间的函数关系近似地

用线性方程来代替：

$$F_j = F_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \cdots + = \frac{\partial f_j}{\partial x_n}(x_1 - x_{0n}) \ , \tag{2}$$

式中：F_{0j}为系统优化设计后残留的像差值，$(x_n - x_{0n})$为各光学元件由于误差导致的失调量，F_j为系统波像差的测量值。由于已经线性近似，F_j可以用 Fringe Zernike 多项式来表示。已知$(\frac{\partial f_j}{\partial x_1}\cdots\frac{\partial f_j}{\partial x_n})$为像差对各个失调量的一阶偏导数，为方便讨论，这里用差$(\frac{\delta f_j}{\delta x_1}\cdots\frac{\delta f_j}{\delta x_n})$来近似地代替微商，得到像差与失调量之间的近似线性方程组：

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1}\Delta x_1 + \cdots + \frac{\delta f_1}{\delta x_n}\Delta x_n \\ \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1}\Delta x_1 + \cdots + \frac{\delta f_m}{\delta x_n}\Delta x_n \end{bmatrix} . \tag{3}$$

用矩阵形式来表示上述方程组，设

$$\Delta \boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix}, \ \Delta \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1}\cdots\frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1}\cdots\frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{bmatrix} , \tag{4}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{F}$ 表示系统失调后的像质与理论设计值相比的变化量，$\Delta \boldsymbol{x}$ 表示失调量，$\boldsymbol{A}$ 表示灵敏度矩阵。当光学系统设计完成后，只要系统装配时引入的失调量不是很大，灵敏度矩阵就唯一确定了，因此在光学系统设计阶段就可以计算出灵敏度矩阵。

3 光刻物镜小比率模型光学系统

与常规光学系统不同，光刻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、装调和检测难度都是目前光学工程所能达到的极限水平[1]。例如，多数元件的装调误差都在 μm 量级，个别元件甚至小于 1 μm。虽然国内已经进口若干高精度机加设备，由于缺乏实际的装调经验，再加上国外的技术封锁，我们只能逐渐摸索出一套光刻物镜的集成方法。因此，在实际光刻物镜制造之前，有必要进行一次甚至多次的物镜验证试验，光刻物镜小比率模型就是在这种情况下产生的，它的光学系统结构图和技术指标要求如图 1 和表 1 所示。

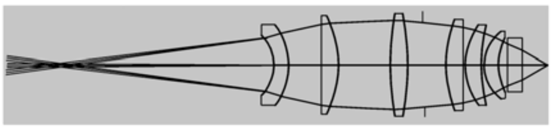


图 1 光刻物镜小比率模型光学系统图

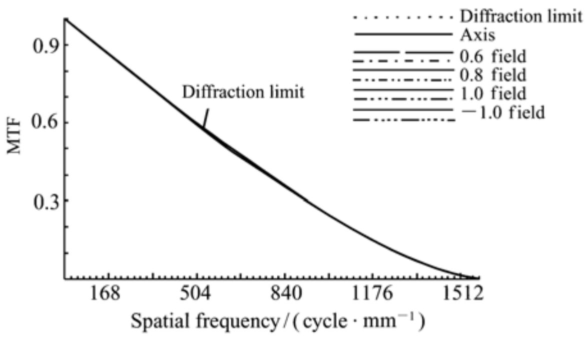
Fig. 1 Chart of small scale projected objective for lithography

表 1 光刻物镜小比率模型技术指标要求

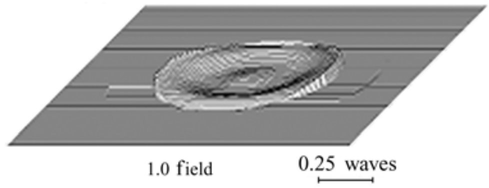
Tab. 1 Specifications of small scale projected objective for lithography

Specifications	Wave length/nm	Focal length/nm	Image *NA*	Index	Total length/nm	Designed wave front error(RMS)/nm	Expected wave front error(RMS)/nm
values	632.8	30	0.5	1.457 021	220	10	40

光学系统由 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 曲线可知系统已经达到衍射极限，系统最大波像差为 10 nm RMS。



(a) MTF曲线
(a) Curves of MTF



(b) 系统最大波像差
(b) Maximum wave front error of system

图 2　系统理论设计结果像质评价

Fig. 2　Image qualities of optical system by theoretical design

4　光刻物镜小比率模型灵敏度矩阵计算

根据光学设计的公差分配要求,表 2 列出了系统各项公差的最大值。计算灵敏度矩阵时失调量 Δx 要大于最大公差值,以保证灵敏度矩阵的准确性。Δx 取值如下:间隔/厚度取 0.2 mm、偏心取 0.2 mm、倾斜取 1°。将 Δx 带入到软件中,得到失调后的波像差,用 36 项 Fringe Zernike 多项式拟合波面,其中全视场的 Zernike 多项式系数分布如图 3所示。由图可知由失调量导致的像质劣化主要体现在 Zernike 系数的前 9 项。此外,*DSX*、*DSY* 分别与 *BTY*、*BTY* 有相近的灵敏度,而且 Tip/Tilt 调节容易引入额外的 *Z* 向移动,因此系统的偏心补偿量只在偏心失调量中选择,减小了补偿量选择范围。因此本文在分析时只讨论前 9 项 Zernike 系数,并且非轴对称失调量中只讨论偏心量 *DSX*、*DSY*。

表 2　光学系统公差分配表

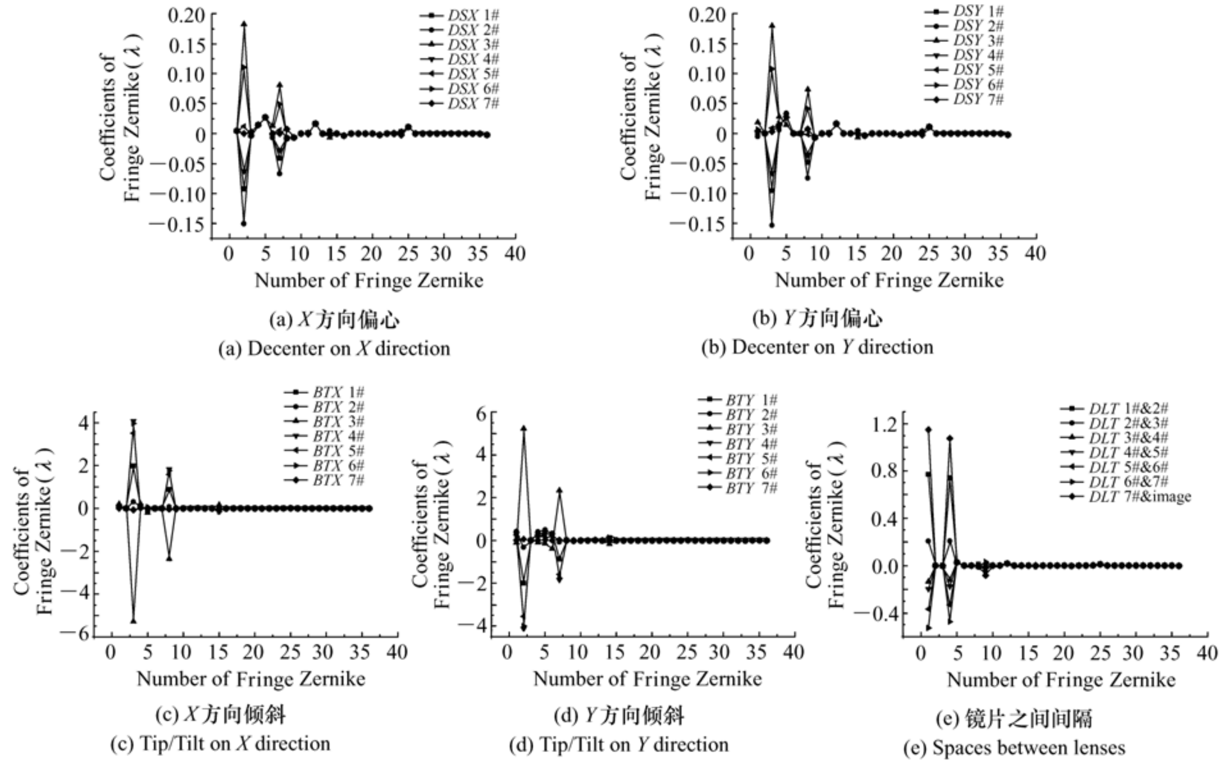
Tab. 2　Tolerance distributions of optical system

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

从图 3(a),(b),(e)可知,对于相同的失调量 0.2 mm,3#镜有最大的偏心敏感性;后截距和 1#镜与 2#镜间距都有较大的轴向像差敏感性,而其余失调量敏感性相对较小,因此补偿量选为:1#镜 *Z* 向移动、像面 *Z* 向移动和 3#镜 *X*、*Y* 方向偏心移动。需要说明的是:根据不同光学系统,都需要通过分析灵敏度矩阵,在敏感失调量中合理选择补偿量。

分别将失调前、后各视场 Fringe Zernike 多项式系数和做几何平均,就可以求得 ΔF。根据式(3)求出灵敏度矩阵 $\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\dfrac{\delta f_1}{\delta x_1}\cdots\dfrac{\delta f_1}{\delta x_{21}}\\ \vdots\\ \dfrac{\delta f_9}{\delta x_1}\cdots\dfrac{\delta f_9}{\delta x_{21}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.01 & -0.01 & -13.88 & 0.01 & \cdots & -52.72 & 3.4 & 3.46 & 113.45\\ 18.01 & 0 & 0 & -14.85 & \cdots & 0 & 0 & 3.72 & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 0 & -0.05 & 0.22 & 0 & \cdots & 3.98 & 0 & 0 & -7.69\end{bmatrix}$$



(a) X方向偏心
(a) Decenter on X direction

(b) Y方向偏心
(b) Decenter on Y direction

(c) X方向倾斜
(c) Tip/Tilt on X direction

(d) Y方向倾斜
(d) Tip/Tilt on Y direction

(e) 镜片之间间隔
(e) Spaces between lenses

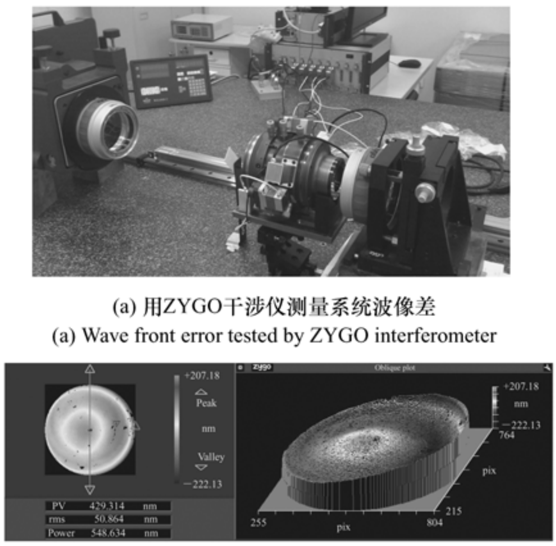
图3　全视场波像差 Zernike 系数分布

Fig. 3　Distributions of Zernike coefficients for wave front errors of edge fields of view

5　光刻物镜小比率模型光机结构装调

光刻物镜小比率模型光学、机械零件加工完成后，镜片面形偏差 $<\lambda/10$(RMS)，机械件经过精修后的最大加工误差为间隔公差 0.1 mm，也满足公差要求。使用高精度激光定心工作台对其进行光机结构装调，定心精度高达 0.5 μm，这些对于得到高质量光学系统都是有利的。用 ZYGO 干涉仪对其波像差进行检测，检测结果如图4所示。

由图4可知，系统波像差为 50.864 nm(RMS)，不满足指标要求。波像差拟合的 Fringe Zernike 多项式系数前9项分布如表3所示。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 向移动补偿调节。虽然 $Z_1 \sim Z_4$值也较大，但它们主要体现了被测件摆放位置误差和系统的离焦量，不能反映系统的真实波面性质，因此不予考虑。



(a) 用ZYGO干涉仪测量系统波像差
(a) Wave front error tested by ZYGO interferometer

(b) ZYGO测量结果
(b) Testing results by ZYGO

图4　用 ZYGO 干涉仪测量系统波像差及测量结果

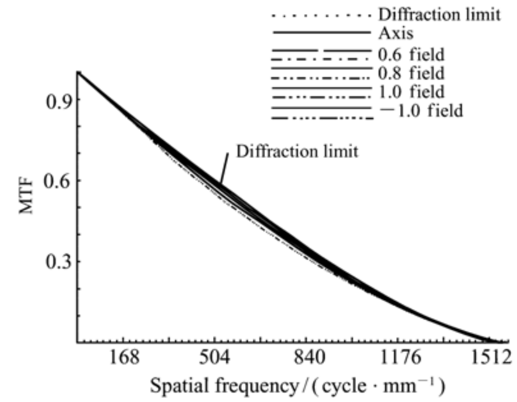
Fig. 4　Wave front error tested by ZYGO interferometer and testing results

表 3　前 9 项 Zernike 系数分布

Tab. 3　The first nine coefficient distributions of Zernike

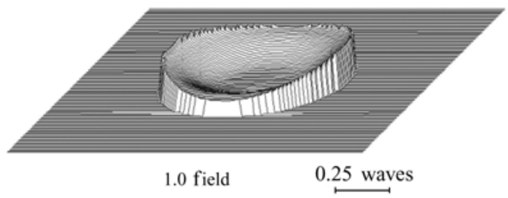
Items	Z_1(Bias)	Z_2(Tilt X)	Z_3(Tilt Y)	Z_4(Power)	
Values(λ)	-0.289	0.197	-0.286	0.436	
Items	Z_5(Astig X)	Z_6(Astig Y)	Z_7(Coma X)	Z_8(Coma Y)	Z_9(Spherical)
Values(λ)	-0.013	0.003	0.137	0.020	0.142

将所得的 Zernike 多项式系数 ΔF 和补偿参数 Δx 代入灵敏度矩阵,求得的系统补偿量值结果如下:1#镜轴向移动量为 +0.184 mm,3#镜 X 方向偏心量为 +0.03 mm,Y 方向偏心量为 +0.012 mm。其中 X 方向偏心补偿量相对于 Y 方向较大,与表 3中 Z_7项较大的结果是一致的。



(a) MTF曲线

(a) Curves of MTF



(b) 系统最大波像差

(b) Max wave front error of system

图 5　补偿后的光学系统成像质量

Fig. 5　Image qualities after compensating

为进一步验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 5 所示,系统最大波像差为 25.3 nm(RMS),满足指标要求。

用干涉仪再次检测补偿后的光学系统波像差,结果如图 6 所示。系统波像差达到25.933 nm(RMS),优于指标要求,证明了这种计算机辅助装调方法的正确性和可行性。

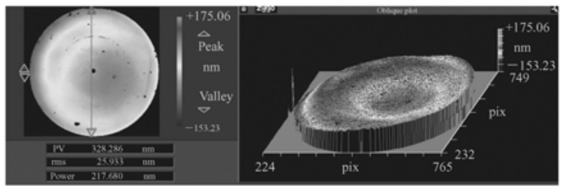


图 6　补偿后系统波像差检测结果

Fig. 6　Wave front error testing results after compensating

6　结　论

本文使用计算机辅助装调技术对具有极小像差要求的光刻投影物镜小比率模型光学系统进行了集成与像质补偿,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,减少了光学系统的装调难度。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 投影光刻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]. 中国光学与应用光学,2010,3(5):452-461.
WANG L P. Optical system of extreme ultraviloet lithography[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*,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]　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,增1:134-137.

LIU L,LI J L,LV Q T,*et al*.. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system[J]. *Opt. Precision Eng*.,2005,S1:134-137.(in Chinese)

[4] 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*.. Alignment technology of the large alt-azimuth ground-base telescope main optical system[J]. *Laser & Infrared*,2010,40(3):233-237.(in Chinese)

[5] 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 mothod of coaxial three-mirror-anastigmat system[J]. *J. Appl. Opt*.,2009,30(6):901-906.(in Chinese)

[6] 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)

[7] LUNDGREN M A,WOLFE W L. Alignemnt of a three-mirror off-axis telescope by reverse optimization[J]. *Opt. Engineering*,1991,30(3):307-311.

[8] 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)

[9] 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)

[10] 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)

[11] 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)

[12] LIU J F,LONG F N,ZHANG W. Study on computer-aided alignment method[J]. *SPIE*,2005,5638:674-681.

[13] 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)

[14] YANG H S,KIM S H,LEE Y W,*et al*.. Computer aided alignment using Zernike coefficients[J]. *SPIE*,2006,6293:629301.

[15] AGUROK I. Double expansion of wavefront deformation in Zernike polynomials over the pupil and the field-of-view of optical systems: lens design, testing, and alignment[J]. *SPIE*,1998,3430:80-87.

作者简介:赵 阳(1982—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事光学系统设计和计算机辅助装调等方面的研究。E-mail:juventus-xx@126.com

巩 岩(1968—),男,吉林梅河口人,博士,研究员,博士生导师,主要从事精密光学仪器、光机电一体化技术等方面的研究。E-mail:gongy@sklao.ac.cn