

光刻物镜热像差主动补偿系统设计与实验

东立剑, 崔庆龙, 李朋志, 赵磊

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 光刻物镜硅片刻蚀过程中的 Z_5 像散会使光刻物镜波像差产生严重的劣化。为了对像散进行实时补偿, 提出一种 Z_5 像散主动补偿系统。该系统由实时数据平台、驱动力系统、柔性支撑结构和光学透镜构成。采用球面干涉仪作为光学透镜表面面形的检测设备, 利用最小二乘法及线性叠加原理确定驱动参数与面形关系。实验进行了主动补偿系统的驱动器响应函数测试、补偿行程测试、补偿精度测试、补偿分辨率测试。结果表明, 系统 Z_5 像散补偿行程达到 735 nm, Z_5 像散补偿精度小于 2 nm, 引入的高阶像差小于 1 nm, 像散补偿分辨率为 2 nm, 该系统能够有效补偿光刻物镜系统波前像差, 使光刻物镜满足像质要求。

关键词 光学设计; 光刻物镜; 热像差; 主动光学; 像散; 响应函数

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0322003

Design and Experiment of Active Compensation System for Thermal Aberration of Lithographic Lens

Dong Lijian, Cui Qinglong, Li Pengzhi, Zhao Lei

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The astigmatism Z_5 in the etching process of lithographic lens silicon wafer can greatly deteriorate wave aberration of the lithographic lens. In order to compensate the astigmatism in real time, this paper proposes an astigmatism active Z_5 compensation system that includes real time data platform, actuator system, flexible supporting structure and optical lens. The sphere interferometer is used as test equipment for optical lens surface shape. The least square method and the linear superposition principle are both used to determine the relationship between actuate parameter and surface shape. The experiments, including test of response function of actuator in active compensation system, test of compensation stroke, test of compensation precision, test of compensation resolution, are conducted. The results show that the astigmatism Z_5 compensation stroke of the system is up to 735 nm. The astigmatism Z_5 compensation precision is less than 2 nm with the high-order aberration less than 1 nm. The astigmatism Z_5 compensation resolution is 2 nm. The system can effectively compensate the wave aberration in the lithographic lens system and satisfy the image quality requirement of lithographic lens.

Key words optical design; lithographic lens; thermal aberration; active optics; astigmatism; response function

OCIS codes 220.3740; 220.1000; 110.1080; 110.2960

1 引言

波像差大小是衡量光刻投影物镜性能最重要的指标^[1]。由于当前光刻机光刻工艺的限制, 为适应硅片尺寸要求, 光刻机照明系统采用矩形照明的方式, 这将导致光学透镜热分布不均, 引入较大的热像差。长时间工作会对光刻物镜的光学系统波像差产生严重的劣化。

为了补偿光刻物镜热吸收产生的热像差, 国内外学者展开了深入的研究。早期光刻投影物镜的热像差补偿主要通过调节光刻投影物镜中镜片的间隔、倾斜和偏心等实现^[2]。通过精密压电驱动器、微位移传感器

收稿日期: 2016-10-22; 收到修改稿日期: 2016-11-16

基金项目: 国家重大专项 02 专项(2009ZX02205)、国家自然科学基金青年基金(61504142)

作者简介: 东立剑(1987—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事光机结构设计及主动光学方面的研究。

E-mail: donglj@ciomp.ac.cn

和柔顺微动机构组成的高精度调整装置实现镜片的精密微调,例如平面内 X/Y 两自由度镜片调整机构^[3-4]、平面内 X/Y/thetaZ 三自由度镜片调整机构^[5]、Z 向镜片调整机构^[6-7]等。红外热补偿技术应用于 Nikon 公司的 S610C(NA=1.2)型光刻机中,采用红外激光束照射光阑附近元件的非受热部分,以补偿热像差中的像散。其基本原理为利用二氧化碳激光(波长 10.6 μm)照射光阑附近的透镜产生常数项像散 Z_5 , 补偿偶极照明的常数项像散或者其他照明模式下由于衍射效应产生的常数项像散^[8]。但是,上述柔顺微动机构只能补偿热像差引入的偏心、轴向等旋转对称像差,对于非对称像散无法补偿^[8-9]。而通过激光照射引入温度变化的方法在时间上较为缓慢,对于实时快速响应也存在一定的局限,而且其补偿范围受到较大的限制,补偿范围较小。因此,如何综合考虑快速响应与非旋转对称像差补偿,实现产率和补偿效果的兼顾成为深入研究的必然。

本文针对 193 nm 光刻物镜进行研究,选择口径 160 mm、中心厚 18.5 mm 的透镜进行热像差主动校正系统的设计与实验,系统主要由实时数据平台、驱动力系统、柔性支撑结构和光学透镜构成。实时数据平台能够输出和采集电信号,方便校正系统信号的输入输出,同时采用驱动力控制系统对驱动力进行高精度控制,满足热像差精度指标要求。柔性支撑结构采用多点柔性支撑的方式固定透镜位置,在轴向均匀分布 4 个驱动器和 4 个柔性约束,使其在产生像散的同时不引入其他高阶误差。系统采用球面干涉仪作为光学透镜表面面形的检测设备,利用最小二乘法及线性叠加原理进行系统输入与输出关系系数确定,得到光学镜片表面面形与驱动力之间的关系式,并通过控制系统精确控制输出力,完成热像差 Z_5 像散的补偿,使光刻物镜满足像质要求。

2 热像差校正方法

为了使光刻机稳定高效地运行,必须实时补偿长时间照明引入的热像差。由于光刻工艺的特殊性,引入的热像差是无法实时测量的,所以只能通过分析预测的方式得到像散补偿量,一般的像质补偿策略如下:首先精确建立光学系统数学模型,通过数值计算得到一定时间光瞳的辐照度,得到热吸收入热像差的大小;然后通过轴向调整机构、波长等参数调节进行初步像质补偿;最后通过主动光学元件补偿像散等非对称像差,完成光刻物镜波像差的实时补偿。本研究所提出的主动校正系统主要是为了补偿轴向调整等无法补偿的非对称像差。

为了更好地校正计算得到的热像差,采用最小二乘法计算校正力。对单独的校正力分析,其驱动力与透镜面形呈一定的线性关系,可以表示为

$$Z_i(x, y) = K_i(x, y) \times F_i, \quad (1)$$

式中 $K_i(x, y)$ 为第 i 个驱动器单位驱动力所产生的面形,即驱动力与面形的响应函数, $Z_i(x, y)$ 为第 i 个驱动器驱动产生的表面面形, F_i 为第 i 个驱动器输出的作用力。根据线性叠加原理,透镜最终产生的表面面形为各个驱动器单独引入面形的线性叠加,即:

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n Z_i(x, y) = \sum_{i=1}^n K_i(x, y) \times F_i, \quad (2)$$

式中 n 为驱动器的个数。本研究所提的主动校正系统具有 4 个驱动器,利用条纹泽尼克多项式对表面面形 $Z(x, y)$ 进行拟合,其中 Z_m 表示校正的第 m 项泽尼克系数。建立校正力与面形的矩阵关系式:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{KF}, \quad (3)$$

将(3)式进行展开如下:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{m1} & K_{m2} & \cdots & K_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

利用最小二乘法即可得到驱动力与表面面形之间的关系,通过驱动力的控制得到所需要补偿的表面面形。

3 主动校正系统设计

主动校正系统主要由实时数据平台、驱动力系统、柔性支撑结构和光学透镜构成,其流程图如图 1 所示。柔性支撑结构和光学透镜组成执行机构,完成像散的生成,驱动力系统采用气动控制的方式进行气压的控制,进而完成输出力的高精度控制。实时数据平台采用 10 kHz 的采样频率进行输出数据的采集,并进行相应的数据分析。

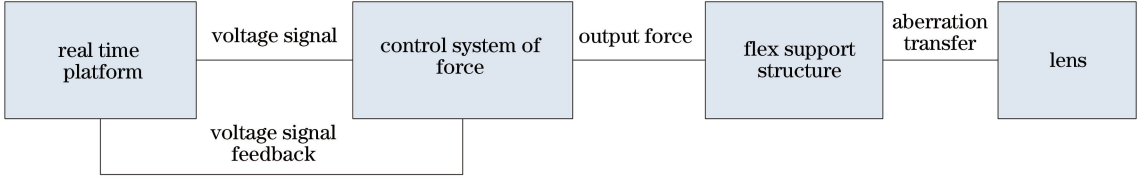


图 1 主动校正系统流程图

Fig. 1 Flow chart of active compensation system

3.1 柔性支撑结构及透镜尺寸

作为超高精度光学仪器,193 nm 光刻物镜对系统波像差有着极为苛刻的要求。这就要求变形镜应尽量减少补偿像散过程中伴随产生的误差,同时其固有频率应避开光刻物镜整体的一阶固有频率,以免在调节过程中引起共振。

为了满足上述性能要求,主动变形镜设计原理如图 2 所示,整体方案设计如图 3 所示,变形镜主要由可变形内框、外框、光学镜片组成。内外框通过四处周向均布的铰链连接,在进行力驱动时,驱动力沿周向分量互相抵消,使内框在产生像散的同时镜片表面面形刚体位移较小。每两处铰链之间分布一个力驱动器,在 X 方向上布置两个 +Z 方向的力驱动器、沿 Y 向布置两个 -Z 方向力驱动器进行力的输出。其中 X 轴上驱动器向上推动内框,Y 轴上驱动器向下拉动内框,两者的共同作用使镜框内框产生 Z₅ 马鞍状变形,内框与光学镜片之间采用胶粘的方式固定,进而带动光学镜片产生 Z₅ 像散。

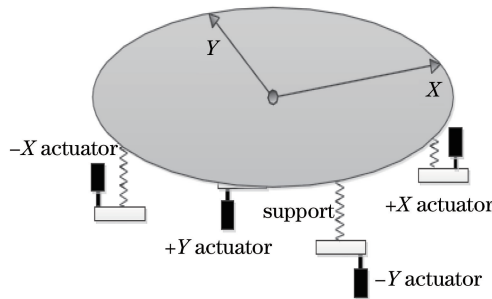


图 2 主动变形镜原理

Fig. 2 Principle of active deformable lens

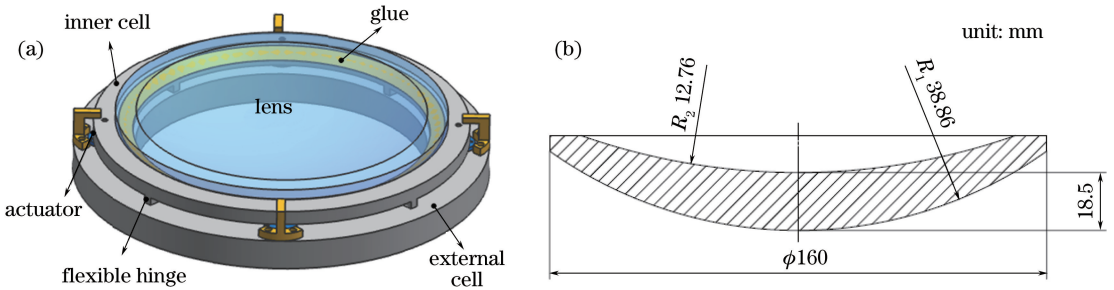


图 3 整体方案设计图。(a) 柔性支撑结构; (b) 透镜尺寸

Fig. 3 Design drawing of entire scheme. (a) Flexible supporting structure; (b) lens size

3.2 驱动力系统

驱动力系统由气源、过滤减压阀、气压比例阀、传感器、气动驱动器组成,通过气压的控制来实现输出力

的精确控制。通过减压阀 5 μm 颗粒过滤和 0.6 MPa 减压,使输出气压保持较高的洁净度和稳定的压力,确保气压比例阀供气的稳定性。气压比例阀的输出压力与输入电压呈线性关系,根据比例阀的响应速度、加速度、内部摩擦系数等参数,采用路径规划的方式对输入信号进行过渡控制,同时利用高精度气压传感器采集气压信号进行闭环的变比例积分微分(PID)参数控制,通过预测前馈控制进一步提高比例阀的动态响应特性,使气路系统能够在非常短的时间内达到目标气压,作用于力驱动器,输出高精度力,作为柔性支撑机构的驱动力。

图 4、图 5 分别为气路系统气压控制策略和 PID 控制模块,其中 e 为目标值与采集值之间的偏差, u 为 PID 计算后校正输出电压, v_{de} 、 v_{dde} 为计算过程量。控制调节过程中发现当仅使用比例控制进行气压调节时,气压控制结果会出现一定的偏差,对气压控制精度影响较大。一般情况下可以通过前馈控制的方式来补偿该偏差,但是由于前馈控制是通过系统传递函数提前预测输出数值进行提前供给,而系统的传递函数存在一定的误差,导致前馈补偿无法彻底补偿该偏差,进而采用积分控制器进行偏差控制,使最终的稳态偏差与气压传感器精度在同一水平,有效提高气压控制精度。同时利用实验测试的方式得到 PID 控制具体参数,如表 1 所示。

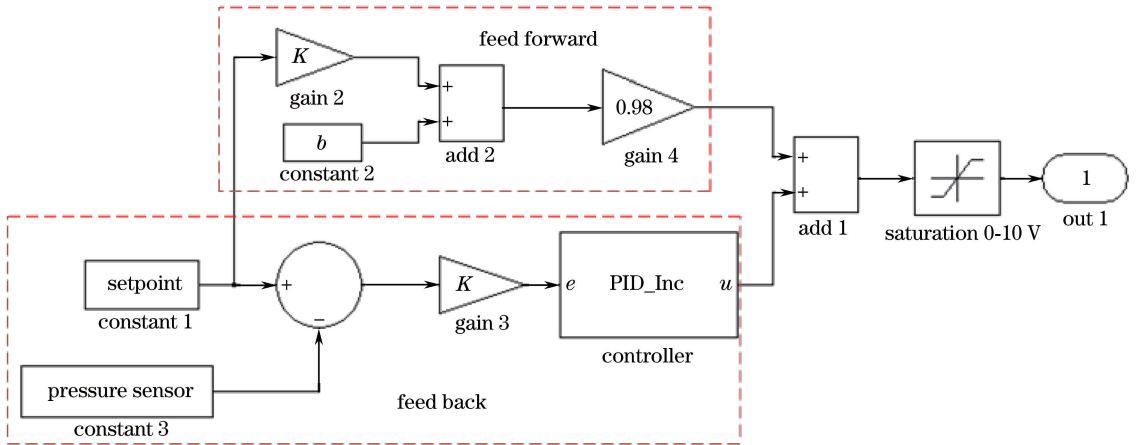


图 4 气压控制策略

Fig. 4 Control strategy of pressure

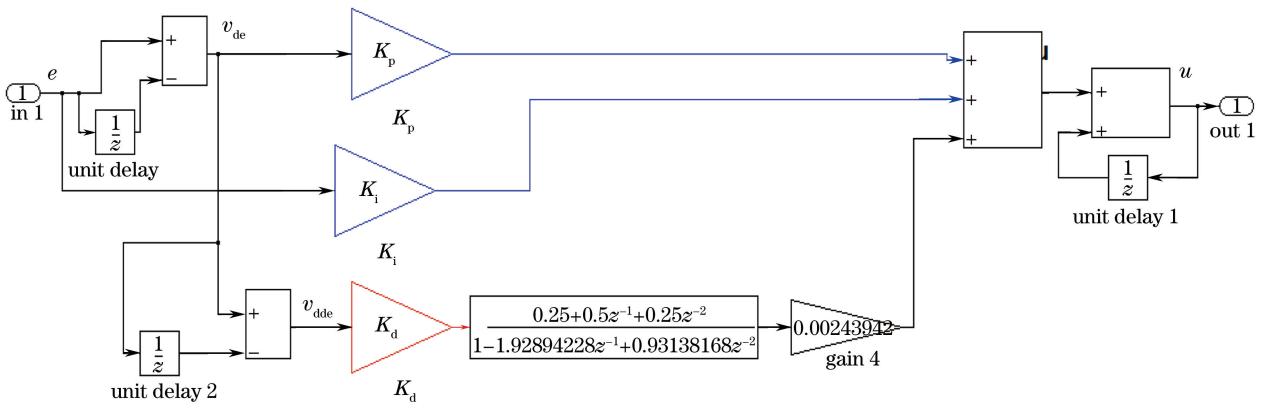


图 5 PID 控制模块

Fig. 5 PID control module

表 1 PID 控制参数

Table 1 PID control parameters

Control parameter	Value
Servo period	10 kHz
K_p	1.5
K_i	0.0005
K_d	5
Feed forward	0.96

3.3 实时数据平台

在硬件在环实验中,要求执行器控制、传感器信号采集以及控制算法计算必须同时工作,因此硬件在环实验必须具备良好的实时性。图 6 所示为本研究搭建的实时数据平台,与其他实时开发平台相比,该平台具有较高的经济性和开放性。应用 Matlab/Simulink 软件编写模型和控制算法,可以通过 Real-Time Workshop(RTW)自动生成实时代码,实现从离线仿真到硬件在环仿真的平滑过渡。另外,该平台采用的 I/O 驱动设备库,支持多种标准 I/O 板,通过选择合适的 I/O 板卡,不仅可以获取各种传感器的输出信号,而且还可以在个人计算机(PC)上模拟控制部分功能。实时平台采用了主机-目标机的技术途径,即“双机”模式,主机和目标机可以是不同类型的计算机。其中,主机用于运行 Simulink,而目标机则用于执行所生成的代码。有一个高度简缩型的实时操作内核运行在目标机上,该实时内核采用 32 位保护模式,通过以太网连接或串口线连接来实现主机与目标机之间的通信。

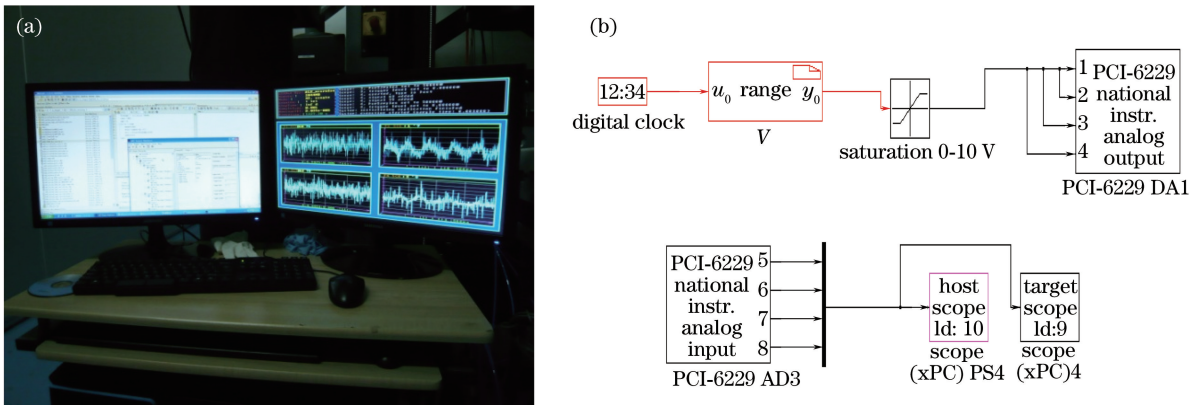


图 6 实时数据平台。(a) 主机与目标机；(b) 程序运行界面

Fig. 6 Real time platform. (a) Host and target PC; (b) program running interface

4 实验过程及结果分析

搭建气压控制测试平台及面形检测平台如图 7 所示。将主动校正系统柔性镜框与透镜集组件放置于 ZYGO 干涉仪调整台上,通过 6 自由度调整,使透镜上表面的圆心与 ZYGO 干涉仪标准具共焦点,在检测显示器上显示出当前透镜的初始面形,完成初始调节。

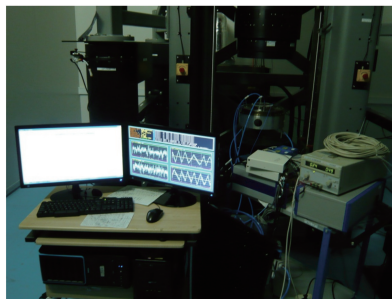


图 7 气压与面形测试平台

Fig. 7 Platform of pressure and surface shape measurement

实验环境参数如下:

- 净化等级:净化室 1000 级;
- 温度:环境温度(22±0.2) °C(最佳);
- 最大温度梯度:<1 °C/h;
- 相对湿度:35%~60%;
- 空气压力范围:0.75~1.014 MPa;
- 空气压力变化:±0.025 MPa;

最大气压变化梯度:0.010 MPa/h。

4.1 响应函数测试

响应函数的测试方法是分别驱动 4 个驱动器,得到单位驱动力输入引入的透镜表面面形的变化量,该变化量作为驱动力与表面面形的响应函数。实验系统气压传感器输出 0~10 V 电压(P)对应 0~0.006 MPa 的气压,气压控制输出阶跃量为 0.5 V,变化范围为 0.5~4 V,利用 ZYGO 球面干涉仪测量驱动过程中光学透镜表面面形,通过条纹泽尼克多项式系数拟合的方式进行面形表述,干涉仪采用 32 次平均的方式测量,每个阶跃量得到 8 个面形拟合数据,利用 8 个数据平均值表示当前驱动工况下的面形参数,实验结果如图 8 所示,图中 P_x 、 N_x 、 P_y 、 N_y 分别为柔性支撑结构+X、-X、+Y、-Y 方向上驱动器的驱动气压值。离焦与轴向位移间的关系为

$$T_z = \frac{\Delta_{\text{power}}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D}{2R}\right)^2}} \quad (5)$$

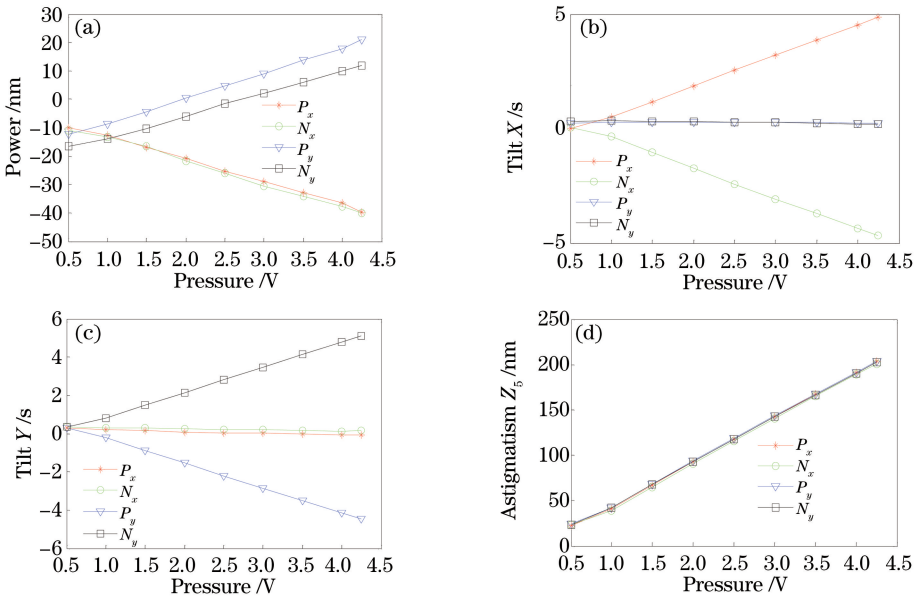


图 8 气压与面形系数关系。(a) 轴向；(b) X 倾斜；(c) Y 倾斜；(d) 像散 Z_5 。

Fig. 8 Relation of pressure and surface shape coefficient. (a) Axial direction; (b) tilt along X direction; (c) tilt along Y direction; (d) astigmatism Z_5

通过离焦的变化量可计算得到光学透镜轴向位移,从图 8(a)得知,随着正 X 方向驱动力的增加,产生离焦项随之降低,即表示透镜沿轴向向上产生一定的位移。X 方向与 Y 方向上的驱动器对离焦的影响正好相反,在 4 个驱动器同时驱动时相互抵消,使透镜在轴向上固定不变。同时根据图 8(b)、(c)得知 X 倾斜和 Y 倾斜之间是互相解耦的,X 方向驱动器工作时不引入 Y,而 Y 方向驱动器工作时同样不引入 X。根据图 8 (d)得知 4 个驱动器对像散 Z_5 的敏感度是相同的,单位驱动力引入的像散大小相同,根据测量结果得到气压与面形之间的传递函数如下:

$$\begin{bmatrix} Z_2 \\ Z_3 \\ V_{\text{power}} \\ Z_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.345 & -1.336 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.335 & 1.340 \\ -8.21 & -8.30 & 8.51 & 8.32 \\ 50.02 & 50.03 & 49.91 & 49.98 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ N_x \\ P_y \\ N_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

4.2 补偿行程测试

补偿行程测试是指驱动器施加最大气压值,测量测试主动校正系统产生面形值,其标志着主动校正系统校正能力的大小,图 9 给出了主动校正系统的行程测试。首先施加气压为初始气压时得到初始面形,如图 9 (a)所示;再施加最大气压值得到该工况下面形,如图 9(b)所示;补偿面形应为透镜表面面形的变化量,对得

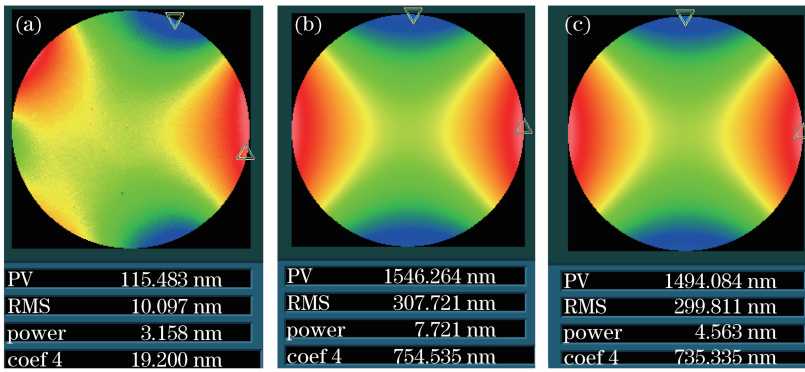


图 9 补偿行程测试结果。(a) 初始面形；(b) 最大面形；(c) 补偿行程

Fig. 9 Test results of compensation stroke. (a) Initial surface shape; (b) maximum surface shape; (c) compensation stroke
 到的两个面形进行点对点相减,得到上表面面形的变化量即为主动补偿系统的补偿行程,如图 9(c)所示,测得主动校正系统像散补偿行程达到 735 nm。

4.3 补偿分辨率测试

分辨率测试表示主动校正系统所能补偿的最小面形能力,通过不断地降低输入气压的变化量,得到不同气压工况下的面形变化量,随着输入气压数值的降低,干涉仪测得的面形结果无法分辨即认为达到分辨率极限,对于小于分辨率的面形该主动校正系统无法校正。可分辨的评价方法为:当 90% 以上的测量结果在阶跃量的 50% 以内即可认为可分辨。从图 10 可知,系统的分辨率为 2 nm。

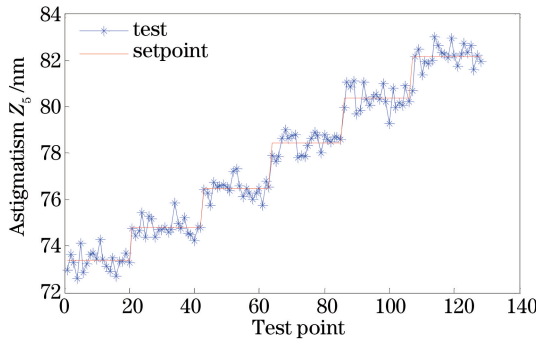


图 10 分辨率测试结果

Fig. 10 Test result of resolution

4.4 补偿精度测试

变形镜系统精度($V_{accuracy}$)包括 Z_5 设定点精度和 0.2 h 稳定性:

$$V_{accuracy} = \sqrt{V_{Z_5\text{-setpoint}}^2 + V_{stable}^2}, \quad (7)$$

式中 $V_{Z_5\text{-setpoint}}$ 为理论像散补偿量。

由于当前无光刻物镜整体系统,只能采用干涉仪进行面形测试,干涉仪采用 32 次平均测量的方式测量光学元件的面形数据,测量时间较长,无法得到高频动态下的面形数据,所以无法评估干涉仪测试的噪声。认为其测量重复性为系统测量的精度,从 ZYGO 干涉仪说明书得知,实验使用干涉仪的测量重复性为 0.3 nm,满足主动补偿系统的测试需求,简化精度公式为

$$V_{accuracy} = V_{Z_5\text{-actual}} - V_{Z_5\text{-setpoint}}, \quad (8)$$

式中 $V_{Z_5\text{-actual}}$ 为实际测量补偿量。

利用传递函数公式[(6)式],当目标设定点 Z_5 已知时,通过传递函数逆运算即可得到所需要施加的气压值,主动校正过程中除了引入所需要的非对称像散外,不可避免会附带一定的高阶像差,高阶项的引入对光学系统像质会产生一定的劣化影响,弱化波前像差的主动校正效果,因此必须保证高阶像差在较小的范围内。测试结果如表 2 所示。其中, $V_{precision}$ 为理论与实际差值,即为补偿精度,图 11 为 ZYGO 干

涉仪测量主动校正过程中产生的实际像散。实验结果表明,像散补偿精度小于 2 nm。对测试数据结果进行数值分析,去除 $Z_1 \sim Z_5$ 及 Z_{12} 项像差,计算剩余泽尼克系数的均方根值(RMS),结果如图 12 所示,引入的残差小于 1 nm。

表 2 精度实验测试点

Table 2 Test points of precision experiment

Pressure / $V_{Z_5_setpoint}$	$V_{Z_5_setpoint}$		
	100 nm	300 nm	500 nm
P_x/V	0.503253	1.509758	2.516263
N_x/V	0.506643	1.519928	2.533213
P_y/V	0.496271	1.488814	2.481356
N_y/V	0.494419	1.483258	2.472097
$V_{Z_5_actual}/nm$	99.672	300.029	500.901
$V_{precision}/nm$	0.328	0.029	0.901
High order errors /nm (RMS: $Z_6 \sim Z_{37}$ without Z_{12})	0.316	0.484	0.716

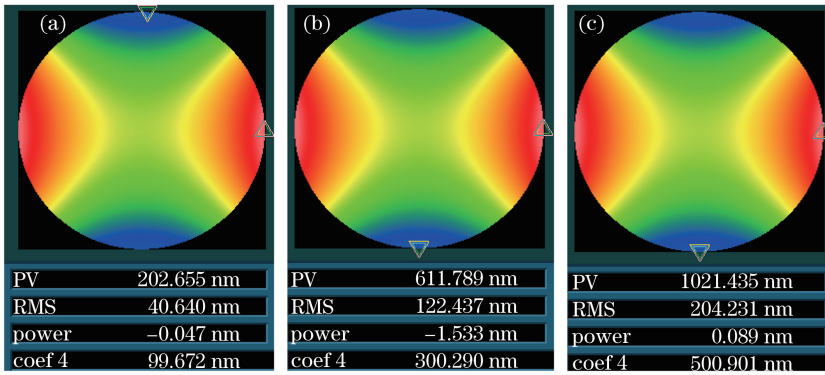


图 11 精度测试。(a)100 nm; (b) 300 nm; (c) 500 nm

Fig. 11 Precision test. (a) 100 nm; (b) 300 nm; (c) 500 nm

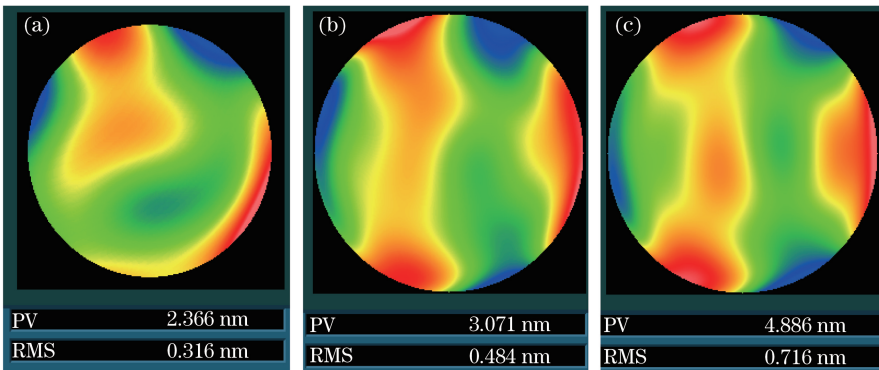


图 12 $Z_6 \sim Z_{37}$ 不包含 Z_{12} 的高阶像差均方根值。(a) 100 nm; (b) 300 nm; (c) 500 nm

Fig. 12 High order aberration RMS values of $Z_6 \sim Z_{37}$ without Z_{12} . (a) 100 nm; (b) 300 nm; (c) 500 nm

5 结 论

针对光刻物镜热像差补偿需求,建立主动校正系统,采用多点柔性支撑方式,利用 4 个驱动器进行力驱动,通过调整驱动力的大小保证热像差的补偿范围和补偿精度。系统采用球面干涉仪作为光学透镜表面面形的检测设备,利用最小二乘法及线性叠加原理进行系统输入与输出关系系数确定,得到光学镜片表面面形与驱动力之间的关系式,并通过控制系统精确控制输出力,完成热像差 Z_5 像散的补偿。实验结果表明,主动校正系统像散补偿行程达到 735 nm,像散补偿精度小于 2 nm,引入的高阶像差小于 1 nm,像散补偿分辨率为 2 nm,该系统能够有效补偿光刻物镜系统波像差,使光刻物镜满足像质要求。

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: 29-31.
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计与像质补偿[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011: 29-31.
- [2] Zhao Feifei, Tang Jianyu, Huang Wei, *et al.* Computer-aided alignment for the lithographic lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 34(6): 0622001.
赵菲菲, 唐剑宇, 黄 玮, 等. 投影光刻物镜的计算机辅助装调[J]. *光学学报*, 2015, 34(6): 0622001.
- [3] Michael T, Ralf H, Erich M, *et al.* Optical imaging device, particularly an objective, with at least one optical element: US6191898B1[P]. 2001-02-20.
- [4] Zhao Lei, Gong Yan, Zhao Yang. Flexure-based X-Y micro-motion mechanism used in lithographic lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1425-1433.
赵 磊, 巩 岩, 赵 阳. 光刻投影物镜中的透镜 X-Y 柔性微动调整机构[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(6): 1425-1433.
- [5] Zhang Defu, Zhao Lei. Research of monolithic XY micro-adjustment mechanism based on compliance matrix [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(2): 269-275.
张德福, 赵 磊. 基于柔度矩阵法的整体式 XY 光学微调机构研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(2): 269-275.
- [6] Wolfgang H, Juergen F, Karl-eugen A, *et al.* Imaging device in a projection exposure facility: US7961294B2 [P]. 2011-06-14.
- [7] Guo Kang, Gong Yan, Ni Mingyang. Design of a monolithic apparatus for the fine axial adjusting mechanism of optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s122002.
郭 抗, 巩 岩, 倪明阳, 等. 光学元件一体化精密轴向调整机构的设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s122002.
- [8] Toshiharu N, Yasuhiro O, Taro O, *et al.* Thermal aberration control in projection lens [C]. *SPIE*, 2008, 6924: 69241V.
- [9] Ohmura Y, Ogata T, Hirayama T, *et al.* An aberration control of projection optics for multi-patterning lithography [C]. *SPIE*, 2011, 7973: 79730W.