

光刻物镜中主动透镜的变形和像差特性

姚长呈^{1,2} 巩 岩¹

¹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

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 高精度光刻投影物镜在工作过程中吸收激光能量产生热像差, 在离轴照明模式(如偶极照明)下, 热像散显著且随时间变化, 传统的被动光学方法无法补偿此类像差。提出在折射式光刻投影物镜系统中使用主动光学的方法, 通过力促动器作用在透镜上使镜片变形以补偿初阶热像散。采用有限元分析方法, 分析了简化的折射平板在促动力作用下的变形特点和像差特性; 用几何光学理论近似论证了该补偿方案的可行性, 并且分析了促动器分布、促动力大小、促动器与平板接触区域尺寸以及支撑结构对平板变形的影响。结果表明, 在优化的支撑结构下, 主动平板可以较好地补偿系统初阶热像散和初阶四叶像差, 为光刻系统热像差的补偿提供了一个思路。

关键词 光学设计; 主动光学; 光刻物镜; 热像差补偿; 像散

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0422004

Research on Deformation and Aberration of Active Plate Used in Lithographic Objective

Yao Changcheng^{1,2} Gong Yan¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract High precision lithographic projected objective suffers from thermal aberrations due to energy absorption. Under off-axis illumination, the dipole mode and time-changing thermal astigmatism is outstanding, which cannot be corrected or compensated by traditional passive optical systems. Active optics using mechanical actuators to compensate the primary thermal astigmatism of deformed lens in a refractive lithographic objective system is proposed. The actuators are located on a refractive plate, and the finite element analysis is applied to study the deformation and aberration. The theoretical analysis by geometrical optics is made to prove the feasibility for compensation, and the influences of actuator locations, active force loads, actuator size and lens supporting conditions are considered. The results show that the active plate performs well to compensate primary astigmatism and primary 4-foil aberration under the optimized supporting conditions, which provides an idea for thermal aberration control in lithographic systems.

Key words optical design; active optics; lithographic objective; thermal aberration compensation; astigmatism

OCIS codes 220.1080; 110.5220; 220.1000

1 引 言

高精度光刻投影物镜在长时间工作过程中, 由于镜片吸收热量造成温度升高, 导致折射率、面型以及应

收稿日期: 2015-10-12; 收到修改稿日期: 2015-11-24

基金项目: 科技部中白合作项目(2011DFR10010)、吉林省自然科学基金(20140203001GX)

作者简介: 姚长呈(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光刻物镜热仿真和主动矫正技术等方面的研究。

E-mail: yaochangcheng18@126.com

导师简介: 巩 岩(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事短波光学和光机一体化设计与仿真等方面的研究。

E-mail: gongy@sklao.ac.cn

力状态改变,从而产生热像差,系统分辨率明显降低。为了减小装调误差及装调应力的影响,光刻物镜中部分透镜单元可以通过微调机构进行姿态调整,以补偿由误差引起的倾斜以及关于光轴旋转对称的低价像差,如平移、离焦和初级球差。然而为了提高分辨率,对于不同类型的掩模,光刻物镜曝光方式常采用偶极照明、四极照明等离轴照明模式。在此模式下,由于曝光区域的不对称,会引起镜片非旋转对称的温度场分布及热变形,使系统产生像散等非旋转对称的热像差,从而使光学性能下降^[1]。热像散随曝光开始而出现并缓慢增长,这种热像差无法通过微调机构的调节加以矫正,解决这个问题较为有效的方案是在系统光阑附近放置一个主动变形镜^[2-3]。对于折反式光刻系统,将光阑附近的反射镜作为主动变形镜是首选,结合主动光学理论可以很好地矫正各种形式的像差。对于折射式光刻系统,在不改变系统整体光学结构的前提下,只能选择透镜作为变形镜。

由于技术保密,可查阅资料较少,公开资料中主要提出了两种用于光刻机热像差补偿的透射式变形镜。一种是蔡司公司提出的液体透镜^[4-5];另一种是采用热补偿技术的变形透镜^[6-8]。液体透镜主要由一厚一薄平行放置的基板(氟化锂)以及填充在两块基板构成的腔体内的液体组成。液体采用与基板材料折射率相近的去离子水。去离子水通过循环装置与外界相连通以保持折射率稳定。利用安装在下表面薄板边缘的促动器,沿光轴方向施加作用力,使下表面变形。由于液体的力解耦作用,上表面厚板变形相对较小,可以忽略,此方案相当于主动改变变形透镜的一个表面的面型,从而引入像差,以平衡热效应引起的像差。通过不同促动方案可以补偿不同形式的像差。这种装置一方面由于引入了液体,需要精密的防泄漏装置,另一方面由于氟化锂的水解性以及温度的变化,需要循环系统和温控系统保持液体折射率的稳定,使得补偿系统十分复杂且难以控制。热补偿技术是通过加热分布在变形镜表面的热阻单元,或者通过红外激光照射变形镜的特定区域,使变形镜获得特定的温度场分布或热变形,从而将系统非旋转对称的热像差矫正为旋转对称的像差,之后配合微调机构加以矫正,达到热像差补偿的目的,然而这种补偿技术也存在装置过于复杂、时效性差的问题。

考虑装置简单性和时效性,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所相关研究人员对矫正方案进行了改进,通过对单透镜的机械促动实现热像差的矫正^[9]。在他们的研究中,只分析了变形透镜一个表面发生变形的情况,在此基础上,本文以平板为模型,研究了机械促动式变形透镜的像差特性。综合考虑了促动器尺寸、促动器分布、促动力大小以及支撑方式对透镜变形的影响,并将两个表面的变形拟合为Zernike多项式,利用光学软件研究其像差特性和补偿效果,并估算了应力双折射的影响。

2 主动补偿平板模型

2.1 补偿原理

光刻物镜热像差主要来自三个方面,折射率改变、热变形和热应力双折射。以温度升高前后光程差(OPD)表示的系统热像差为

$$D_{\text{system}} \approx \int_L \Delta n \cdot dl + \int_{\Delta L} (n + \Delta n - 1) \cdot dl + D_{\text{birefringence}}, \quad (1)$$

式中 n 为物镜玻璃折射率, Δn 为折射率的变化, L 为光在系统中传播的总路径, $D_{\text{birefringence}}$ 为热应力引起的附加光程差。(1)式第一部分表示由于温度升高导致折射率改变而引入的光程差,第二部分表示热变形导致的光程差,第三部分表示热应力引起的附加光程差。研究表明,热变形和应力双折射对光刻物镜热像差的影响与折射率改变对光刻物镜热像差的影响相比,可以忽略不计^[1]。因此系统由于热效应引起的光程差可表示为

$$D_{\text{system}} \approx \int_L \Delta n \cdot dl. \quad (2)$$

由于温度升高,折射率也随之升高,因此(2)式表示热效应引起的光程差为正值,即实际波前超前理想球面参考波。为了平衡热像差,需要减小系统的光程差,对于探讨的主动平板(AL),由于力促动器的作用导致镜面变形,将使得光在玻璃中传播的路程减小:

$$D_{AL} \approx \int_{\Delta L} (n-1) \cdot dl, \quad (3)$$

式中 $\Delta L=L_2-L_1$,表示主动平板的变形,如图1所示。

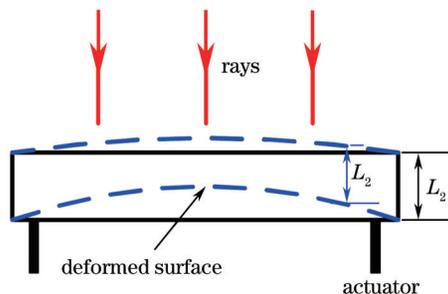


图1 平板变形图

Fig.1 Deformation of plates

若暂不考虑应力双折射的影响,投影物镜系统总的光程差可以表示为

$$D_{total} \approx \int_L \Delta n \cdot dl + \int_{\Delta L} (n-1) \cdot dl, \quad (4)$$

(4)式表明通过机械促动力使透镜变形,从而减小光程差以平衡热效应的影响,理论上是可行的。

2.2 主动平板有限元模型

主动补偿装置针对的是由光刻热效应导致的随时间变化的非旋转对称像差。非旋转对称热像差主要出现在离轴照明模式中,特别是偶极照明模式下的热像散。以X轴方向的偶极照明为例,其非旋转对称热像差主要为以Zernike多项式表示的 Z_5 项以及n-foil像差。通过2.1节的论述,为了补偿 Z_5 项,主动平板需要在X轴方向上对应较显著的变形,以平衡系统的光程差。

主动平板使用机械促动器产生变形,其像差或变形特性受诸多因素影响,如促动器与平板接触面积、促动器分布、促动力大小、平板支撑结构等。

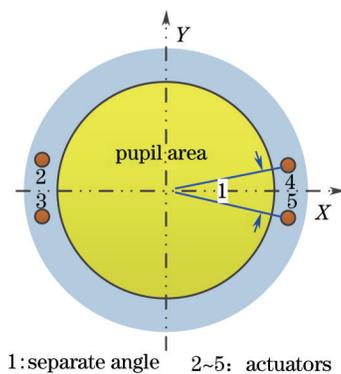


图2 促动器分布

Fig.2 Location of actuators

在自适应光学中,促动器安装在反射镜背面预先设计好的特定位置,每一个促动半径上均匀分布若干个促动点,整个系统承载上百个促动器,可以根据需要调整并矫正各种像差,对高阶像差也有较好的矫正效果。对于所研究的用于折射式光刻系统的主动补偿元件,为了避免遮拦,促动器只能装在通光区域之外,靠近平板边缘区域,如图2所示。另一方面,由于热像散的对称性质,促动器也应该关于Y轴对称分布,因此促动器个数应为偶数。为了调整变形区域的面积,选择4个促动器较为合理。深紫外光刻物镜中光阑附近通光区域约为300 mm,选取平板模型口径为340 mm,有效口径为300 mm。光阑附近的透镜径厚比约为6~8,实验中选取平板厚度为40 mm。

3 模拟结果和讨论

不同的支撑结构会导致不同的变形结果,为了研究主动平板两个表面的变形与促动力的关系,首先选

择最简单的环形支撑进行分析,该支撑方式中,上下表面边缘均采用螺纹压圈压实以实现平板的固定。分析了接触区域半径为4~8 mm、单个促动器促动力为300 N时,下表面的Zernike系数变化趋势,选取具有代表性的像散 Z_5 、初级球差 Z_9 、二阶像散 Z_{12} 以及初阶四叶像差 Z_{17} ,绘制结果如图3所示。

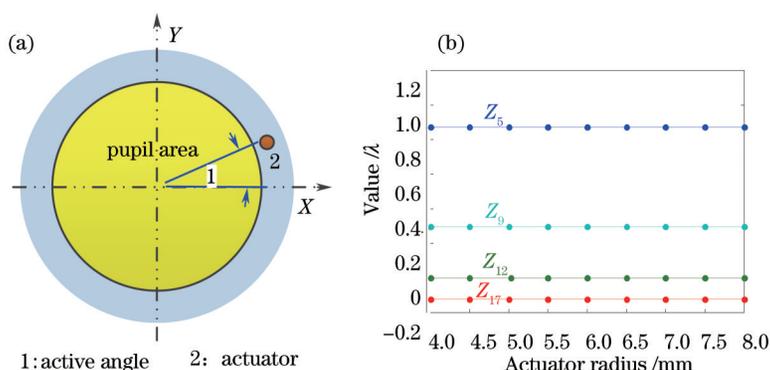


图3 变形与促动器尺寸的关系。(a) 促动模型图;(b) 下表面面型参数与促动器半径的关系

Fig.3 Relationship between deformation and actuator size. (a) Schematic of the active model; (b) relationship between the coefficient of lower surface and the of actuator radius

促动角定义为促动点和表面中心的连线与X轴正向的夹角,如图3(a)所示,为了说明结论的普遍适用性,促动器促动角为随机选取的一个角度。由图3(b)可以发现,平板下表面的变形与促动器尺寸无关,只取决于平板受到促动力的大小。参考商用压电陶瓷(PZT)促动器,设置促动器与平板接触区域半径尺寸为5 mm,分析促动力对面型的影响。图4(a)所示为促动力在50~300 N间变化时,两个表面面型参数的变化趋势。同时作为对比,以 Z_5 项为例,图4(b)描绘了两个表面的面型差值随作用力的变化趋势。

结果表明,平板变形与促动力成强线性关系,且两个表面的变形趋势一致。由于透射光程差与平板两个表面的变形差值有关,定义响应函数A为该促动器1N促动力作用下上下表面Zernike多项式表示的面形系数差。

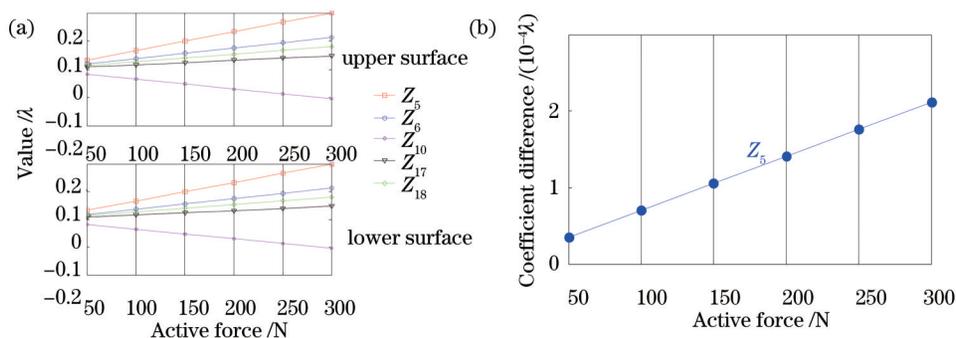


图4 不同促动力下两个表面的变形结果。(a) 变形趋势;(b) 变形差(Z_5)

Fig.4 Deformations of two surfaces at different force loads. (a) Deformation tendency; (b) coefficient difference (Z_5)

由于模型的对称性,在单个促动器任意促动角度下,平板都具有相似的面型,不同的是相互之间存在角度的旋转,相对旋转的角度与促动器角度有关。以图4分析所用的模型参数作为基准,其促动器夹角为基准角,为了计算促动器夹角相对转动后的面型系数,引入一个转换矩阵 T_i :

$$T_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_i & -\sin \theta_i & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta_i & \cos \theta_i & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \sin(m \cdot \theta_i) & \cos(m \cdot \theta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中*i*为促动器编号,*m*为角向阶数, θ_i 表示促动器*i*相对于促动器的旋转角度。

多个促动器共同作用的效果等同于每个促动器单独作用效果的叠加^[10]。在*n*个促动器作用下,上下表

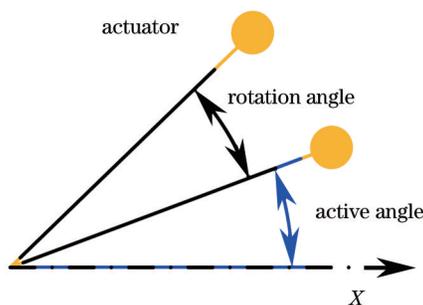


图 5 旋转角定义

Fig.5 Definition of rotation angle

面的面型系数差可表示为

$$Z = \sum_{i=1}^n f_i \cdot T_i \cdot A, \quad (6)$$

式中 f_i 为促动器 i 贡献的力, Z 为多个促动器作用下上下表面的Zernike面型系数差。以需要矫正的热像散 Z_5 作为目标项,在4个促动器作用下,上下表面的面型系数差可表示为

$$Z(5) \approx n \cdot \sum_{i=1}^4 [f_i \cos 2\theta_i \cdot A(5) - f_i \sin 2\theta_i \cdot A(6)]. \quad (7)$$

由于平板的变形量极小($1\sim 2\mu\text{m}$),作为估算,可以近似认为促动力施加前后光线传播的路径不发生变化。取熔石英平板折射率为1.56,要获得与热像散相当的亚波长量级,促动力约为 $1\times 10^4\text{N}$,此时,有限元分析结果显示,平板最大拉应力远远超出材料的抗拉极限,导致材料碎裂。因此,此模型无法获得理想的像散矫正效果。为了达到与热像散相当的量级,需要对模型加以改进。

为了研究促动器夹角(图2)的影响,模拟了不同促动器夹角下两个表面面型参数的变化,结果如图6所示。

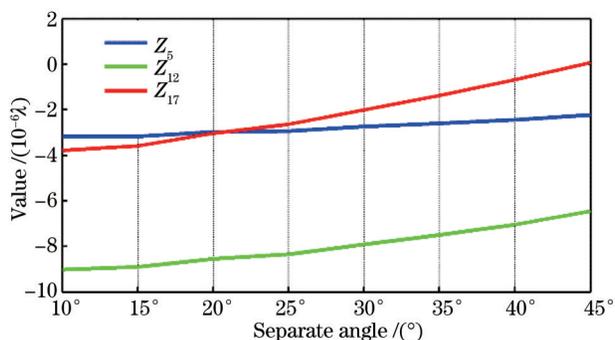


图 6 不同促动器夹角下的面型参数变化

Fig.6 Coefficients differences under different separate angles

从图6中可以看出, Z_5, Z_{12}, Z_{17} 项随着促动器夹角的增大而减小,且 Z_{17} 减小更快。考虑到促动器的空间尺寸,为达到最佳补偿效果,选取促动器夹角为 10° 进行后续分析。

为了使得两个表面面型系数差值中第5项更明显,需要改进平板支撑结构,在上表面正对应促动器分布的区域使用两个压紧装置(图7),限制上表面在 X 轴方向的变形,减小上表面面型系数中的 X 轴方向像散分量,以增大面型系数差的像散分量。图8(a)为有限元分析的网格(图中为完整模型的1/4),为了使网格的划分更精细,透光区域采用了均匀的映射网格划分模式,同时,促动区域网格被加密细分以使计算结果更为精确。表1为有限元分析(FEA)的模型参数。

表 1 有限元分析模型参数

Table 1 Parameters of FEA model

Material	Size	Elastic modulus	Poisson ratio
Fused silica	$\Phi 340\text{ mm}\times 40\text{ mm}$	72.7 GPa	0.16

在300 N促动力作用下,主动平板两个表面的变形差如图8(b)所示,将两个表面的变形结果拟合为

Zernike 多项式, 导入 CODE V 软件, 获得其像差特性如图 8(c) 所示。

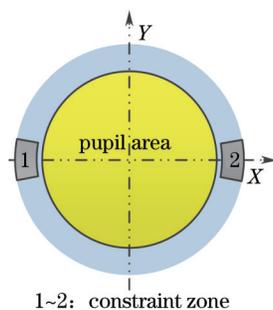


图 7 特殊支撑方式(1,2 位于上表面)

Fig.7 Specific lens supporting mode (1,2 are on the upper surface)

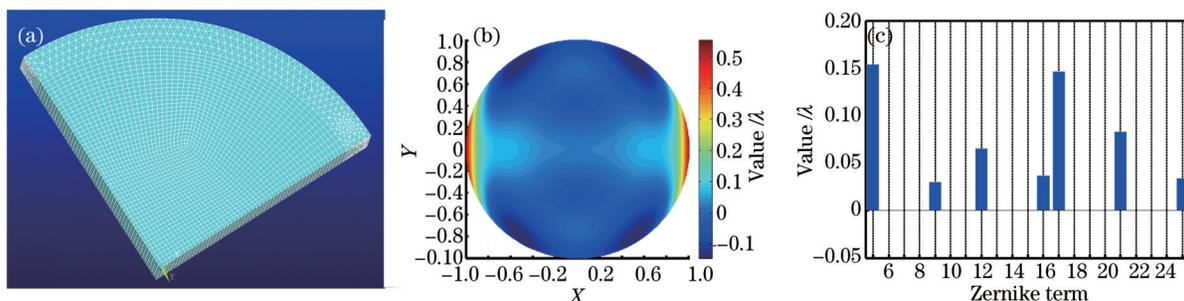


图 8 (a) 有限元网格模型; (b) 变形差; (c) 像差分布

Fig.8 (a) Meshes of FEA model; (b) deformation difference; (c) aberration distribution

从图 8(b) 可以看出, 由于压紧装置限制了上表面在 X 方向的变形, 导致两个表面变形不一致, 差异比较明显, 特别是 X 轴方向上的像散分量。图 8(c) 结果表明, 在此模型下, 由于促动力的存在, 平板像差特性发生变化, 其中主要为 X 轴方向的初阶、二阶甚至三阶像散; 同时由于促动器彼此错开一定角度, 使得四叶像差也很显著。事实上, 光刻物镜热像差中除像散外, 四叶像差也不可忽略, 该模型对四叶像差的矫正效果也很明显。此外, 初阶和二阶球差也比较突出, 可以通过微调机构加以矫正。

为了说明此结果对光刻物镜热像差的补偿作用, 选取光刻物镜曝光过程中一个时间点的热像差作为补偿对象, 去除平移、倾斜和离焦后, 波前像差如图 9(a) 所示。将平板变形数据代入光刻物镜的主动透镜中, 经过优化, 在促动力为 450 N 时, 系统初阶热像散得到比较理想的矫正, 矫正后系统波前像差如图 9(b) 所示。表 2 所示为补偿前后系统主要像差项的值。

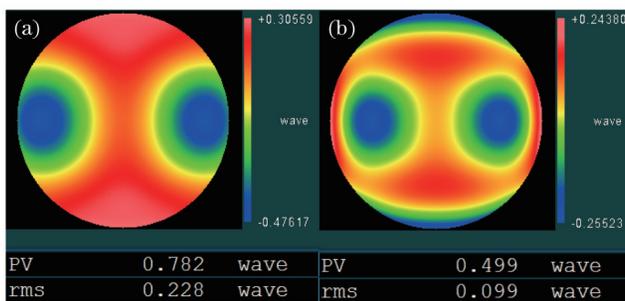


图 9 系统波前像差图。(a) 补偿前; (b) 补偿后

Fig.9 Wavefront aberration maps of system. (a) Before compensation; (b) after compensation

从表 2 可以看出, 该方案对于初阶热像散具有近乎完美的补偿效果, 但同时会造成二阶热像散的增大, 实际应用中需要权衡二者的补偿效果。由于促动位置的局限性导致该方案不具备补偿高阶像散的能力, 在此补偿过程中, 二阶像散略有增大, 约为 0.06λ 。二阶像散的补偿将是今后研究的一个方向。此外还可以看出, 该方案对于热像差中的初阶四叶像差 Z_{17} 也具有较好的补偿效果, 使其下降约 60%。初阶球差也略有增大, 这部分像差可以通过微调机构调整透镜姿态而得到补偿; 二阶和三阶热球差本身较小, 补偿后虽略有增

大,但增加量分别约为0.003 λ和0.004 λ,影响甚小。

表2 补偿前后系统主要像差项对比

Table 2 Comparison of main system aberration terms before and after compensation

Zernike term	Before compensation	After compensation	Relative change /%
Z ₅	-0.5096	-0.0095	98.14
Z ₉	0.0857	0.1186	-38.39*
Z ₁₂	0.2354	0.2994	-27.19
Z ₁₆	-0.0276	-0.0300	-8.70
Z ₁₇	-0.1204	-0.0487	59.55
Z ₂₁	-0.0325	-0.0319	1.85
Z ₂₅	0.0072	0.0114	-58.33

*Negative value indicates an increment of aberration

由于应力的存在,材料呈现出各向异性,导致光线沿各个方向传播的折射率不同,三个应力主轴方向的折射率可表示为^[11]

$$\begin{pmatrix} \Delta n_1 \\ \Delta n_2 \\ \Delta n_3 \end{pmatrix} = -\frac{1}{2}n_0^3 \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{12} \\ q_{12} & q_{11} & q_{12} \\ q_{12} & q_{12} & q_{11} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中 n_0 为各项同性材料的折射率, σ 为主应力, q 为光弹性系数,取 $q_{11} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ Mpa}^{-1}$, $q_{12} = 2.3 \times 10^{-6} \text{ Mpa}^{-1}$ 。有限元分析结果显示,平板体内沿 Z 轴方向的主应力极小,近似为0。由应力双折射引起的附加光程差可表示为

$$D_{\text{BR}} = \sum_i^N \left(\frac{\Delta n_1 + \Delta n_2}{2} \right) \cdot l_i = -\frac{n_0^3}{2} \sum_i^N \frac{q_{11} + q_{12}}{2} \cdot (\sigma_x + \sigma_y)_i \cdot l_i, \quad (9)$$

式中 N 为光线穿过的晶格数, l_i 为光线方向晶格的长度。分析结果表明, $(\sigma_x + \sigma_y)_{\text{max}} = -0.0717 \text{ Mpa}$,由此可计算得出最大附加光程差为 0.04λ ,与变形所产生的光程差相比可以忽略。

4 结 论

提出通过机械力促动器施加力作用在透镜边缘,使镜面产生形变来补偿光刻投影物镜中随时间变化的热像散,并将透镜简化为一个折射平板模型进行分析。从几何光学原理角度论证了该方法补偿热像差的可行性。分析了促动器分布、促动力大小、促动器与平板接触区域尺寸对平板变形的影响,同时提出了一种优化的支撑结构以获得足够的像散。结果表明,平板两个表面的变形与促动力大小成强线性关系;促动器夹角越小,像散越大;变形与促动器尺寸无关;在环形支撑下,两个表面的变形趋势一致,且面型相似,无法满足补偿要求;在优化的支撑结构下,像散可以达到亚波长量级。将变形数据导入物镜系统中,对比补偿前后系统的像差变化,结果表明,该方案可以使系统的初阶热像散得到较为理想的补偿,对初阶四叶像差也有较好的补偿效果,且额外引入的像差较小。

参 考 文 献

- 1 Chen H, Yang H J, Yu X F, *et al.*. Simulated and experimental study of laser-beam-induced thermal aberrations in precision optical systems[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(18): 4370-4376.
 - 2 Nakashima T, Ohmura Y, Ogata T, *et al.*. Thermal aberration control in projection lens[C]. SPIE, 2008, 6924: 69241V.
 - 3 Uehara Y, Matsuyama T, Nakashima T, *et al.*. Thermal aberration control for low k1 lithography[C]. SPIE, 2007, 6520: 65202V.
 - 4 Conradi O, Bleidisted S, Hauf M, *et al.*. Projection objective of a microlithographic projection exposure apparatus: United States, US 7830611B2[P]. 2010-11-9.
 - 5 Yuan Wenquan, Gong Yan. Study on characteristics of aberrations for an active liquid lens in lithographic objective lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222003.
- 袁文泉, 巩 岩. 光刻物镜中主动液体透镜的像差特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1222003.

- 6 Muller-Rissmann W, Holderer H, Von Bunau R. Optical arrangement having improved temperature distribution within an optical element: United States, US6521877B1[P]. 2003-02-18.
- 7 Vdovin G, Loktev M. Deformable mirror with thermal actuators[J]. Opt Lett, 2002, 27(9): 677-679.
- 8 Hyde R A, Mythrold N P. Electroactive polymers for lithography: United States, US8076227B2[P]. 2011-12-13.
- 9 Sun Zhen, Gong Yan. Performance of aberration compensation of lens active optics[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(8): 118-122.
孙 振, 巩 岩. 透镜主动光学的像差补偿性能[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 118-122.
- 10 Li Hongzhuang, Wang Jianli, Lin Xudong, *et al.*. Active optics experiment system with thin-mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 120-125.
李宏壮, 王建立, 林旭东, 等. 薄反射镜主动光学试验系统[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 120-125.
- 11 Greninger C E, Needham G A, Rebar J. Optical distortions and birefringence in high power laser windows: model and computer code[J]. Appl Opt, 1985, 24(17): 2797-2803.

栏目编辑: 韩 峰