

# 高成像质量光学系统的元件旋转补偿

刘春来 黄 玮 尚红波 许伟才 杨 旺

(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** 在高成像质量的光学系统的集成制造中,受元件的面形和材料的均匀性误差的影响很难满足极限的成像质量要求,必须采用多种像质补偿措施,元件的旋转补偿是其中必要的像质补偿措施之一。提出了一种光学系统光学元件旋转补偿优化方法,该方法可以用于获取元件的最佳旋转角度。实验验证了该方法的可行性,证实了旋转补偿对系统波前像差具有较强的补偿能力。通过研究旋转补偿的机理总结出可用于评估光学系统旋转补偿能力的多边形原则,并以此作为光学材料筛选的原则之一。最后提出了一种针对球面多视场系统的旋转补偿优化方法,并得到了光学设计软件的分析验证。旋转补偿是高精度光学系统制造和集成中经济有效的像质补偿措施,对进一步提升光学系统的性能具有重大的意义。

**关键词** 光学设计;高成像质量;旋转补偿;材料筛选;波前像差

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0911001

## Compensation Using Clocking Lens Elements in High Imaging Performance Optical Systems

Liu Chunlai Huang Wei Shang Hongbo Xu Weicai Yang Wang

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

**Abstract** In the manufacturing process of high imaging performance lenses, the errors of the surface figure and the material homogeneity make it hard to realize extremely-small aberration lenses. Lots of compensation strategy must be applied and the lens elements clocking is an essential one. A clocking algorithm that can figure out the right angle of lens is proposed and the validity of the algorithm is proved by an experiment, it also shows that clocking is a potential strategy of wavefront compensation. A principle that can be used to judging the compensability of a lens and selecting optical material is proposed. At the end of the paper, a method of modeling multi-field optical system for clocking compensation is proposed, and the analysis result of optical design software proves that it's useful. Clocking is an effective and economic compensation method in high performance lens manufacturing process, and it is meaningful for image performance improving.

**Key words** optical design; high imaging performance; clocking compensation; material choosing; wavefront error

**OCIS codes** 220.1000; 220.3620; 160.4670

## 1 引 言

对于现代高成像质量光学系统,特别是投影光刻物镜,为了实现较高的像质要求,其光学表面的质量要求和光学材料的特性要求已经达到了加工制造的极限水平<sup>[1-2]</sup>。为了进一步降低光学系统的波前像差,通常需要采用多种像质补偿措施<sup>[1,3]</sup>。元件的旋转和材料的筛选在精密光学系统中是必须采

用的像质补偿措施<sup>[3-4]</sup>。光学设计分析软件的应用、光学表面面形和光学材料折射率均匀性测量精度的提高<sup>[5-7]</sup>,使光学系统中各元件透射波前误差的预测成为可能,为光学系统中元件的最佳旋转位置的确定提供了数据条件。

本文通过元件透射波前误差的叠加来描述系统成像质量,并以此建立数学模型,提出了一种用于确

**收稿日期**: 2013-01-19; **收到修改稿日期**: 2013-03-06

**基金项目**: 国家重大专项基金(2009ZX02205)

**作者简介**: 刘春来(1986—),男,硕士,主要从事深紫外光学系统补偿策略与装调方面的研究。

E-mail: lcl8627@163.com

定元件最佳旋转角度的优化方法;通过元件间旋转补偿原理的分析,提出了一种评估系统旋转补偿能力的方法,该方法可以作为光学材料的筛选依据;通过旋转补偿实验验证了该优化方法的有效性和准确性。最后将该方法进行了延伸以用于对球面多视场系统进行旋转优化。

## 2 旋转补偿角度优化

高成像质量的光学系统一般用波前像差来描述其成像性能<sup>[1]</sup>,系统的波前像差是各元件材料、系统制造和装配误差引入的透射波前变化量的叠加。元件的表面面形和材料折射率均匀性都会引入系统透射波前的误差,该误差随着元件的旋转而旋转。旋转补偿是利用各元件的表面面形和材料折射率均匀性误差引入的透射波前误差叠加后的抵消效应来实现补偿作用的,所以本文提及的透射波前误差仅指元件的表面面形和折射率均匀性误差引入的透射波前误差。元件透射波前误差的描述方式直接决定了旋转优化算法的实现难度和优化效率,所以透射波前误差的描述方式是旋转优化算法实现的关键。文中采用 Fringe-Zernike 多项式<sup>[8]</sup>(如无特别说明,以下均简称为 Zernike 多项式)的极坐标形式来描述。由于透射波前误差的旋转补偿主要补偿的是透射波前误差的低频部分,所以 Zernike 多项式的前 36 项即可满足优化算法的需求,另外 Zernike 多项式的极坐标形式相互正交并且旋转一定角度后其表示形式不变,所以 Zernike 多项式的极坐标形式较适合于旋转优化算法。

优化算法中需要对透射波前误差进行大量的旋转计算。根据 Zernike 多项式的特点,其任何一个非旋转对称项都有一个与其相对应的正弦或余弦项,将这两项称为正余弦相关项。如 Zernike 多项式的  $Z_2$  和  $Z_3$  项:

$$Z_2 = C_2 R \cos A, \quad (1)$$

$$Z_3 = C_3 R \sin A, \quad (2)$$

式中  $C_2, C_3$  为  $Z_2, Z_3$  项系数,  $R, A$  为其坐标的半径和角度变量。顺时针旋转  $\theta$  角后,  $Z_2, Z_3$  变化为  $Z'_2, Z'_3$ :

$$Z'_2 = C_2 R \cos(A - \theta), \quad (3)$$

$$Z'_3 = C_3 R \sin(A - \theta), \quad (4)$$

三角函数展开并转化成矩阵运算后得出

$$\begin{bmatrix} C'_2 \\ C'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $C'_2, C'_3$  为旋转后的  $Z_2, Z_3$  项系数。对于旋转对称项系数保持不变。其他正余弦相关项具有相同的旋转计算形式,如果将透射波前误差的 Zernike 系数表示成向量形式,则可以构成 Zernike 多项式前 36 项的旋转矩阵:

$$\mathbf{B}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cos \theta & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

则 Zernike 系数向量  $\mathbf{C}$  旋转角度  $\theta$  后的系数向量  $\mathbf{C}(\theta) = \mathbf{B}(\theta)\mathbf{C}$ 。

旋转优化的目标是使系统的波前像差的均方根(RMS)值最小, Fringe-Zernike 系数与 RMS 值具有如下的关系:在已知 Zernike 系数  $C_n$  和归一化因子  $Z_{m,n}$ , 去掉倾斜量和离焦量的 RMS 值为

$$Z_{\text{RMS}} = \sum_{n=5}^{36} \frac{C_n^2}{Z_{m,n}^2}. \quad (7)$$

该优化问题属于非线性单目标优化问题,为了限制旋转角度的范围,缩小优化变量的搜索范围,将旋转角度的范围  $(-\pi, \pi)$  作为优化的约束条件。由于目标函数计算的复杂性,很难得到目标函数的梯度函数,并考虑目标函数计算效率较高,采用多起点优化算法实现旋转角度的全局优化。

## 3 旋转补偿能力评估

透射波前的旋转补偿只是寻找透射波前误差组合后的 RMS 值的最小值,其补偿能力与组合中每片元件的透射波前误差的分布是密切相关的。为了使光学系统具有较高的旋转补偿能力,对旋转补偿能力与透射波前误差分布的关系进行分析是很有必要的。

由于非正余弦相关项之间是无法实现补偿的,因此仅对正余弦相关项的补偿关系进行分析。将 Zernike 多项式中正余弦相关项看成是一个向量的 X 和 Y 分量,而角度  $\theta$  为向量与 X 轴正向的夹角。每一个镜片的正余弦相关项可以等效成长度不变、角度任意的一个向量,而多个镜片间正余弦相关项的旋转补偿能力即各向量间首尾相连的能力(构成多边形的能力)。

图 1 为 Zernike 多项式正余弦相关项补偿的矢

量表示。图 1(a)可以很容易实现首尾相连构成一个多边形,并有多解,而图 1(b)则没有办法构成多边形。根据构成多边形的条件:任何一边不大于其他边之和,则多个镜片的正余弦相关项能够实现完全补偿的条件是:任何一个镜片透射波前误差的

正余弦相关项系数的平方和不大于其他镜片的正余弦相关项系数平方和之和。

为了验证该结论,对三组镜片的均匀性进行旋转补偿,其补偿数据如表 1 所示。

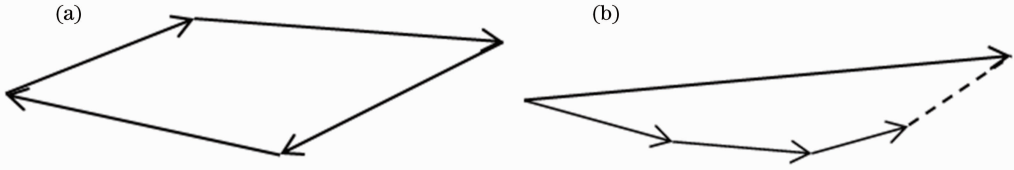


图 1 Zernike 正余弦相关项补偿的矢量表示。(a)补偿能力好;(b)补偿能力差

Fig. 1 Compensation process of Zernike sine and cosine correlation coefficients represented by vectors. (a) Good compensation; (b) bad compensation

表 1 均匀性的旋转补偿

Table 1 Homogeneity compensation by clocking lens elements

	Lens 1 RMS /nm	Lens 2 RMS /nm	Lens 3 RMS /nm	Combined RMS /nm	After clocking RMS /nm	Compensation /%
Group 1	3.30	2.03	3.34	5.49	2.33	57.65
Group 2	2.70	2.02	6.57	6.61	6.04	8.54
Group 3	2.09	3.09	2.61	2.53	1.06	58.36

从表 1 可以看出,对于不同的透射波前误差组合其旋转补偿能力是不同的,第一和第三组合的旋转补偿能力均大于 50%,而第二种组合的旋转补偿能力仅为 8.54%。图 2 为各组的三个镜片均匀性的 Zernike 系数前 9 项分布。

$Z_8$  项分布相对于其他两个镜片要大的多,如图 1(b)的情况不满足构成多边形原则,使其补偿能力下降,而其他两组则与之相反。当然,透射波前误差的旋转优化需要综合考虑多组正余弦相关项旋转优化角度,但筛选元件和材料时也应该根据多边形原则尽量避免上例第二种组合的情况出现,尽量提高镜片间的旋转补偿能力。

从图 2 中可以看出第二组中镜片三的  $Z_6$ 、 $Z_7$ 、

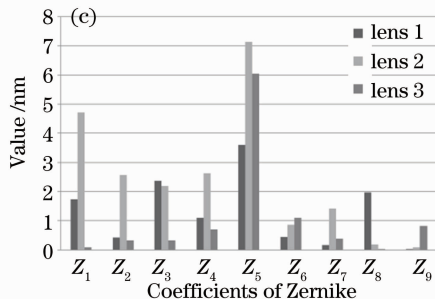
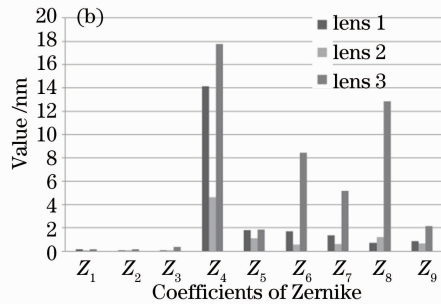
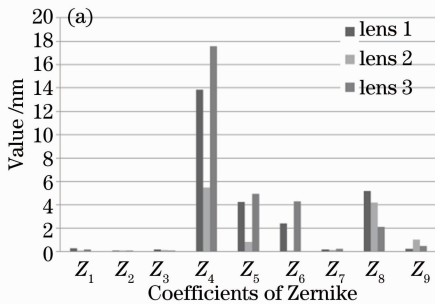


图 2 均匀性数据的 Zernike 系数前 9 项分布。(a)第一组;(b)第二组;(c)第三组

Fig. 2 First 9 Zernike coefficients of homogeneity. (a) Group 1; (b) group 2; (c) group 3

### 4 旋转补偿实验验证

为了验证该旋转补偿优化算法对透射波前误差的预测能力与优化结果的正确性,通过干涉检测实验进行验证。由于测量平面透镜的透射波前时可能发生多表面干涉的现象,影响干涉测量结果,所以需要采用多表面干涉测量技术(MST)<sup>[9-10]</sup>。图3(a)、(b)分别为实验的示意图和实物图,将可独立旋转的平面镜组放在两个平面标准具(TF、RF)之间,由干涉仪测量其透射波前。

实验首先分别获取单个镜片的透射波前,将三个透射波前的 Zernike 多项式描述代入旋转优化程序进行优化计算得到后两个镜片的最佳旋转角度和预测的叠加透射波前,并检测出在最佳旋转角度下,三个镜片的实际叠加透射波前。图4和图5分别为旋转优化的 RMS 最小值和最大值的预测与实验结果。优化程序预测其透射波前的 RMS 最小值为 6.87 nm,最大值为 16.07 nm;实验结果表明其透射波前的 RMS 最小值为 7.83 nm,最大值为 16.2 nm。

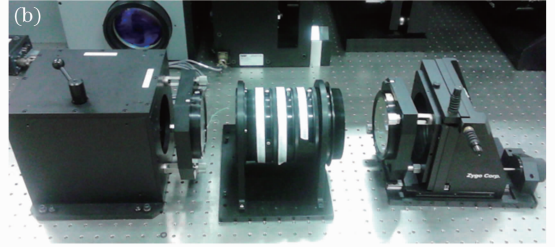
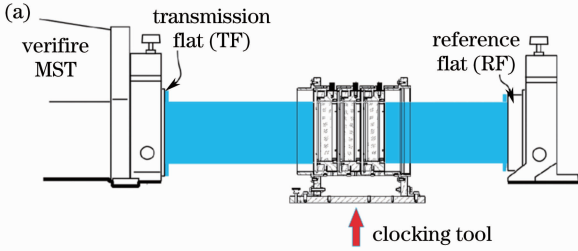


图3 旋转补偿验证实验装置。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 3 Experimental setup of clocking. (a) Schematic diagram; (b) physical map

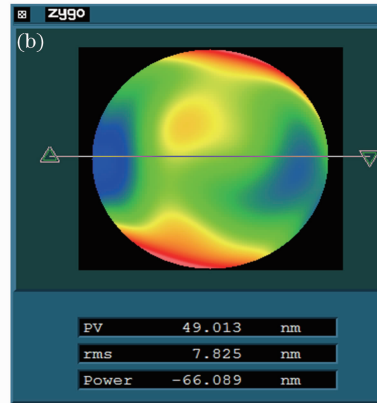
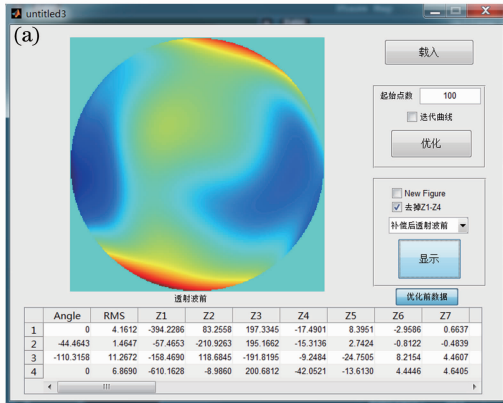


图4 透射波前 RMS 最小值优化。(a)程序预测结果;(b)实验检测结果

Fig. 4 Minimum optimization of RMS for transmission wavefront. (a) Program calculation results; (b) experimental test results

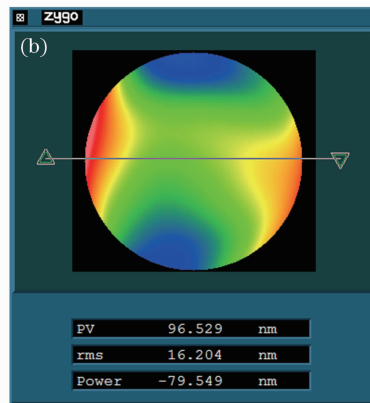
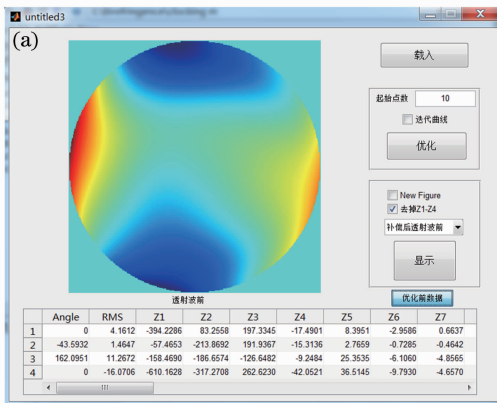


图5 透射波前 RMS 最大值优化。(a)程序预测结果;(b)实验检测结果

Fig. 5 Maximum optimization of RMS for transmission wavefront. (a) Program calculation results; (b) experimental test results

从实验数据中看出优化算法可以很好地预测实验中 3 个镜片固定旋转角度下透射波前的叠加情况 (预测偏差小于 1 nm), 并能找到透射波前 RMS 值在最小和最大情况下的旋转角度值。图 6 是对 10 万组随机角度下透射波前的统计。横坐标为透射波前的 RMS 值, 纵坐标是旋转角度组合的个数。可以看出如果镜片按随机角度摆放, 透射波前的 RMS 值落入 8~15 nm 的可能性较大, 而小于 8 或大于 15 的几率则较小。而旋转优化程序可以很容易获取最优角度值。因此该旋转优化算法可以指导实际平面元件透射波前的旋转优化, 在提升系统的性能中也是很有必要的。

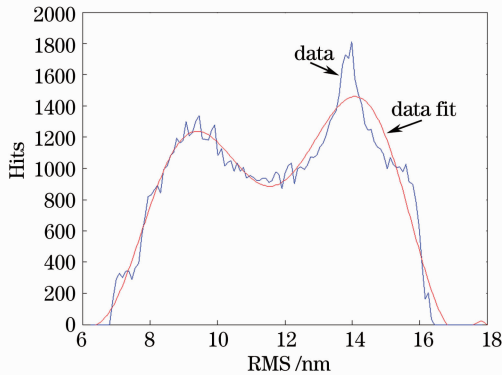


图 6 随机角度组合下透射波前 RMS 值分布  
Fig. 6 RMS distribution of wavefront error in random angles

### 5 球面光学系统的旋转优化

上述实验证明了该旋转补偿优化方法是可以寻找到三平板元件的最佳旋转角度, 下面对一个较复杂的光学系统进行旋转补偿。图 7 为一个小视场的单波长光学系统, 该系统包含 9 个光学元件, 像方对角线视场大小为 0.5 mm, 波像差的设计值为  $0.00542\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )。

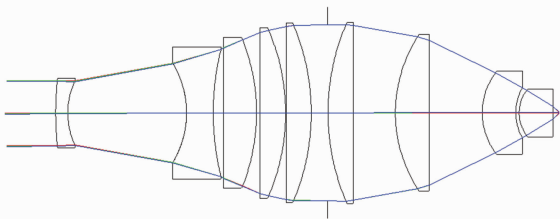


图 7 一个小视场的光学系统

Fig. 7 An optical system with small field of view

由于面形和折射率均匀性都会造成元件的透射波前误差, 所以将面形和折射率均匀性都转化成元件的透射波前误差贴到元件的表面上, 并在光学设

计软件中分析其对系统波前像差的影响。图 8 为由某一批元件面形和折射率均匀性样本生成的各元件透射波前误差的 RMS 值统计。

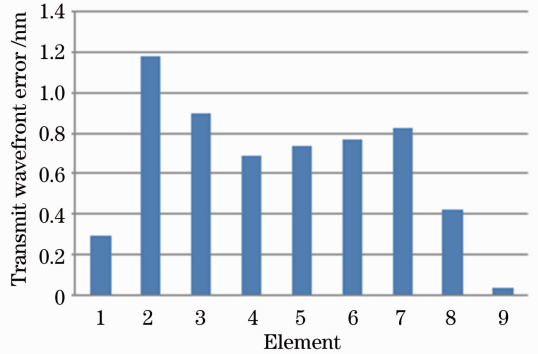


图 8 各元件透射波前误差 RMS

Fig. 8 Transmit wavefront RMS error of elements

图 7 中的光学系统中各元件引入图 8 中对应元件的面形和折射率均匀性引起的透射波前误差后, 其旋转优化前及旋转优化后的 3 个视场点的出瞳如图 9 所示, 各视场点的出瞳波像差如表 2 所示。

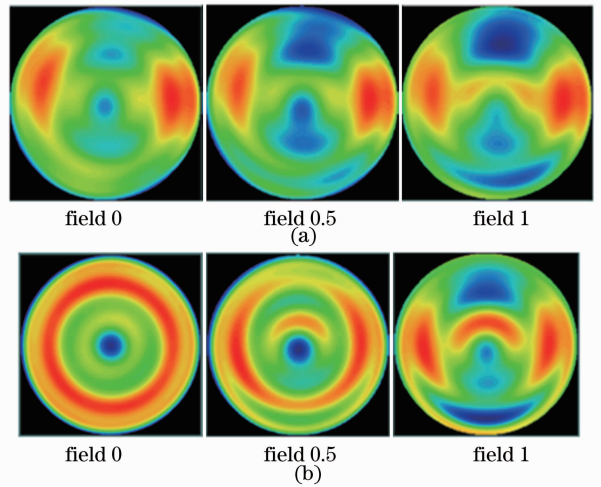


图 9 0、0.5 和 1 视场点的出瞳图。(a) 优化前; (b) 优化后

Fig. 9 Pupil map of field of 0, 0.5 and 1. (a) Original; (b) optimized

表 2 各视场点出瞳波像差

Tabel 2 Wavefront error of fields

	Wavefront error /nm		
	Field of 0	Field of 0.5	Field of 1
Original	5.70	6.26	8.80
Optimized	2.97	2.59	4.56

从表 2 中可以看出旋转优化后各视场点的出瞳波像差均有所下降, 优化效果较好。从图 9 中可以看出, 旋转优化后 0 视场与 0.5 视场的出瞳的非旋转对称项的大部分被补偿, 而 1 视场补偿效果相对

其他视场较差,但该系统的视场较小所以 1 视场也得到了较好的补偿。但对于较大视场的光学系统,使用一组 Zernike 系数来描述的单个元件的透射波前误差是不够的,并且轴外视场的 Footprint(镜片表面上单个视场点的辐照区域)的中心点已不再是旋转中心,这样便增加了旋转透射波前误差的计算难度。

对于旋转对称系统一般通过径向多个视场点来评价光学系统的性能,每个视场点在系统每个元件的 Footprint 近似为一个圆形,如果将该视场点绕光轴旋转一周将扫过一个视场圆,那么每个元件的 Footprint 将扫过一个圆环,如图 10 所示。

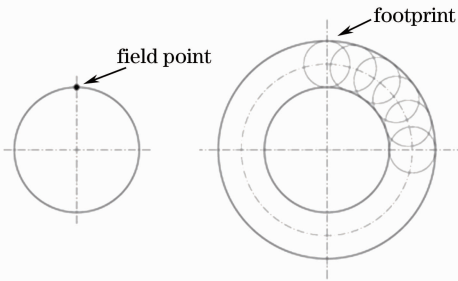


图 10 视场圆及元件表面的 Footprint 圆环  
Fig. 10 A circle of field and its Footprint on the surface of a lens

如图 10 所示,该视场圆上所有点的透射波前误差的叠加可以等效成所有元件的 Footprint 圆环透射波前误差的叠加。对一个视场圆上多个点的优化可以看成是对圆环透射波前误差的旋转优化,而且圆环具有旋转对称的特性。每个视场圆的 Footprint 圆环的透射波前误差可以表示为离散点数据或拟合圆环 Zernike 系数后进行旋转叠加,叠加后对所有视场圆 RMS 值进行加权平均,得到最终目标值。

为了验证该等效方法可行性,选取一组均匀性和面形样本,对某一物镜进行波前像差的旋转优化,并使用光学设计软件对优化结果进行验证,如图 11 所示。

从图 11 中可见优化后所有视场点的 RMS 值均有所下降(各视场波像差的最大值由  $0.061\lambda$  降为  $0.054\lambda$ ),系统波像差降低了 11%,所以该方法是可以对多视场进行旋转优化的。

需要提出的是该优化算法是以元件的折射率均匀性和面形对透射波前的影响可以通过贴到元件表面上的一个二维分布误差来近似表示为条件的。

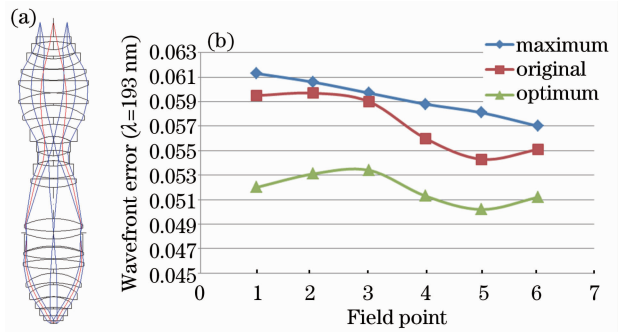


图 11 球面多视场系统旋转优化。(a)物镜系统;  
(b)补偿结果

Fig. 11 Clocking of multi-field system with spherical components. (a) Project lenses; (b) compensation result

## 6 结 论

介绍了一种用于高成像质量光学系统波前像差旋转补偿优化方法,该方法通过元件透射波前误差的叠加来描述系统的成像质量,并以此建立其优化算法的数学模型。通过实验验证了该方法指导光学系统进行旋转补偿优化的有效性,并证明了该数学模型与实际具有很好的吻合度,预测偏差小于 1 nm。另外对光学系统的旋转补偿能力进行了分析,总结出了获取较高旋转补偿能力的元件和材料筛选的多边形原则。最后提出了一个球面多视场系统的旋转优化方法,并通过一个优化实例验证了该方法的可行性,系统性能提升了 11%。在高成像质量的光学系统中旋转补偿可以进一步提升光学系统的性能,降低光学制造和材料制造难度,是高成像质量光学系统制造和集成中经济有效的像质补偿措施。

## 参 考 文 献

- 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.
- Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui, et al.. Deterministic figuring in optical machining by ion beam [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1131-1135.  
戴一帆, 周林, 解旭辉, 等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1131-1135.
- Tomoyuki Matsuyama, Issey Tanaka, Toshihiko Ozawa, et al.. Improving lens performance through the most recent lens manufacturing process [C]. SPIE, 2003, 5040: 801-810.
- Toshiyuki Yoshihara, Ryo Koizumi, Kazuhiro Takahashi, et al.. Realization of very-small aberration projection lenses [C]. SPIE, 2000, 4000: 559-566.

- 5 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang, *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2029–2034.  
苗二龙, 张健, 谷永强, 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2029–2034.
- 6 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, *et al.*. Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812004.  
王平, 田伟, 王汝冬, 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812004.
- 7 Peter Hartmann, Reiner Mackh, Heiko Kohlmann. Advances in the homogeneity measurement of optical glasses at the Schott 20 inch Fizeau interferometer [C]. SPIE, 1996, 2775: 108–114.
- 8 Wei Xueye, Yu Xin. An optical wavefront sensing and reconstruction method based on Zernike polynomials [J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(7): 718–723.  
魏学业, 俞信. 一种基于 Zernike 多项式的波前探测和重构方法[J]. 光学学报, 1994, 14(7): 718–723.
- 9 Shouhong Tang, Richard E Bills, Klaus Freischlad, *et al.*. High accuracy measurements of objects with multiple reflective surfaces with wavelength shifting interferometry [C]. SPIE, 2007, 6723: 67230F.
- 10 Leslie L Deck. Multiple surface phase shifting interferometry [C]. SPIE, 2001, 4451: 424–431.

栏目编辑：张腾