

微透镜阵列加工误差对光学性能的影响

田 霏 刘现磊 张效栋 房丰洲

天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 研究了微透镜阵列加工误差对光学系统成像性能的影响规律,寻求利于改善光学性能的面形误差分布。对面形误差与波前像差之间的转换矩阵进行建模,使仿真与计算的波前像差达到纳米级的误差精度,选用具有正交性的Zernike多项式作为光学和机械的接口,表示加工后光学表面的面形误差,并分别作为干涉图数据引入到已设计的子眼透镜表面,量化分析不同位置下畸变、点列图、点扩展函数(PSF)、调制传递函数(MTF)的改变情况。分析结果表明相同形状分布下,面形精度峰谷(PV)值对光学系统畸变和MTF的影响呈现递变规律,并且点扩展函数的二维分布与视场位置存在明显的对应关系;相同面形精度下,向左和中心对称分布的面形误差使得畸变、点列图和MTF在一定相对位置得到改善,而降低了其他相对位置的光学性能。综合考虑各光学参数的变化情况,向右对称分布的面形误差分布对于改善光学系统成像性能有利,为实现成像质量的可控超精密加工制造提供了理论基础。

关键词 光学设计; 成像性能; 影响规律; 误差分布; 干涉图; 转换矩阵

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0222002

Influence of Manufacture Error on Optical Performance of Micro Lens Array

Tian Fei Liu Xianlei Zhang Xiaodong Fang Fengzhou

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Influence of manufacturing errors of micro lens array on optical imaging performance is discussed to quest what distributive surface errors may benefit the improvement of optical performance. Transformation matrix between surface error and corresponding wavefront aberration is established, which achieves high deviation accuracy between simulated and computed wavefront aberrations. Zernike polynomials with orthogonality are utilized as the interface between optics and manufacturing, representing the surface error and wavefront aberration of the finished optical surface with the slow slide servo, acting as the interferogram data imported into the designated surface of 7 sub eye optical system afterwards, thus reflecting the change of distortion, spot diagram, point spread function (PSF) and modulation transfer function (MTF) at different locations quantitatively. Results show that errors with the same distribution but gradually increasing peak-valley (PV) values make the distortion and MTF change with gradient, and two-dimensional distribution of PSF has a remarkable correspondence with field; left and middle distributive wavefront aberrations with the same PV value improve the distortion, spot diagram and MTF at specific relative locations, but worsen optical performance at other locations. With overall consideration of various optical parameters, right distributive surface error benefits the improvement of optical performance, which provides surface shape compensation model for ultra-precision manufacturing process of freeform optics.

Key words optical design; imaging performance; regular pattern; error distribution; interferogram; transformation matrix

OCIS codes 220.2740; 080.2740; 220.3630

收稿日期: 2015-9-7; 收到修改稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家973计划(2011CB706700)、国家自然科学基金面上项目(51375337)

作者简介: 田 霏(1991—),男,硕士研究生,主要从事光学自由曲面测量和评价方面的研究。E-mail: vincent199101@126.com

导师简介: 房丰洲(1963—),男,博士,教授,主要从事光学自由曲面加工,超精密加工技术及装备、微制造、微加工方面的研究。

E-mail: fzfang@tju.edu.cn

1 引 言

基于微透镜阵列的仿生复眼光学系统在飞行器前视红外探测、夜视设备以及预警卫星、雷达系统、舰艇搜索和跟踪系统中有着广泛的应用前景^[1];同时,在微型照相机以及指纹识别系统^[2]等民用工业中也有着重要的应用背景。其中,衍射型微透镜阵列具有设计简单、面型易控制、阵列间填充比高等优点,可用于对高功率半导体激光光束进行匀化^[3]。仿生复眼光学系统大致有三种结构,分别是平面并列复眼结构、单层曲面复眼结构和多层曲面复眼结构。Tanida J等^[4-6]提出了薄束缚光学观察模块(TOMBO)平面复眼成像系统,借助微透镜阵列实现各光通道分离,利用数字处理实现目标重建;Duparre J等^[7-8]将曲面结构引入到仿生复眼设计中,设计出了球面人造复眼成像系统(SACE)。曲面仿生复眼较原有的平面复眼结构在大视场方面有很强的优势,但由于目前光接收器制作工艺的限制,其成像面一般只能设计成平面,所以对于曲面复眼来说,靠近边缘处的小透镜成像通常会处于离焦状态^[9];张红鑫等^[10]利用三层曲面微透镜阵列设计,有效提高了边缘成像质量,最大视场角达到了88°。

由于单元口径小,微透镜阵列常采用特种加工方法制备。例如,德国Fraunhofer等^[11]使用了光刻胶热熔方法,但受加工方法限制,其形状精度难以控制;美国伯克利大学^[12]将聚二甲基硅氧烷薄膜涂在该阵列上制作成球面复眼结构模具,然后采用紫外光敏的环氧树脂在模具中浇成型,这种方法制作的复镜头虽结构复杂,但处理流程复杂、加工周期长,加工成本较高;钟可君等^[13]用数字微镜器件(DMD)代替物理掩膜,建立数字无掩膜光刻系统,结合模型复制方法,制作了高填充因子的正方形基底聚二甲基硅氧烷(PDMS)微透镜阵列,该透镜阵列具有阵列边缘清晰,表面光滑,焦面光斑光强均匀等特点;贺启强等^[14]结合计算机控制光学表面成形技术和大气等离子体化学加工方法,加工了正弦波阵列结构,工件表面精度较高;Radtke D等^[15]则引入了激光雕刻技术,在曲面上加工121×121个相邻夹角为0.177°,视场角为0.354°的微透镜阵列。近些年,基于快刀和慢刀伺服控制技术的超精密车削技术可实现光学复杂曲面的一次成型^[16],已逐渐成为微透镜阵列等微结构的高精度加工手段。Trumper等^[17]采用快速伺服车削(FTS)加工出了正弦波以及正弦网格表面,并设计了主轴转角估计算法提高微结构表面的加工效果;Yi A Y等^[18]采用慢速伺服车削技术加工出5×5的微透镜阵列;Li L等^[19]在弧形光学表面加工透镜阵列,通过微孔径、微透镜阵列及微棱镜;Zhang X D等^[20]借助慢刀伺服超精密车削和微注塑技术实现平面基底微透镜阵列制造,在复眼透镜设计、加工及实验验证方法等方面展开了研究。

而对微透镜阵列制造精度评价主要在表面形貌和光学性能两方面展开。许乔等^[21]用表面轮廓仪及干涉仪检测了光刻胶热熔成形这微透镜阵列的面形及表面质量,并利用成像法检验了微透镜阵列的成像特性及点扩展函数(PSF);Schwider J等^[22]借助干涉仪的“猫眼”定位技术对微透镜阵列单元分别进行焦距测量;朱咸昌等^[23]针对不同类型的微透镜阵列,基于光栅剪切干涉测量法、基于光栅多缝衍射原理的分光法、基于清晰度定焦评价函数的图像处理法和基于哈特曼波前检测原理的测量法对微透镜阵列焦距测量;田大垒等^[24]微透镜阵列对LED光强、照度等光学性能的影响。

综上所述,目前微透镜阵列的研究热点主要在结构设计、加工和测量技术等方面。虽然超精密加工技术可达到很高的尺寸精度,但微透镜阵列的制造仍存在面形控制问题。同时,对于面形精度控制基准局限于几何精度评价结果,这与最终的光学性能应用需求不一致。光学成像质量应是光学自由曲面制造过程中的最终评价指标,如描述初级/次级像差的球差、彗差、色差等,及评价综合成像质量的均方根差(RMS)、点扩展函数、光学传递函数(MTF)等^[25-26]。针对以上问题,拟探寻面形误差与成像质量的映射关系,达到光学器件成像质量可控制的目的。本文以微透镜阵列为研究对象,探究不同误差分布对光学系统成像性能的影响,寻求利于改善光学性能的面形误差分布规律,为实现成像质量的可控超精密加工制造提供必要的理论基础。

2 研究对象及误差分析模型

采用超精密车削加工方法对图1(a)所示的微透镜阵列进行慢刀伺服切削加工,虽然实际加工过程中存在的诸多因素,如机床热变形、机床振动、金刚石刀具磨损、以及夹具的端面误差等,使微透镜阵列各子眼的面形误差存在差异。但是,由于加工模式相同,只是单元所在位置不同,各个子眼的面形误差呈现一定的分布规律。图1(b)所示的干涉仪测得的部分结果表明,面形误差分布与切削入刀角度相关,而入刀角度和单元

分布相关。根据各单元的面形误差分布规律性,将面形误差分为如图2(a)~(c)所示的三种分布。需要考虑由不同误差分布形式及大小所引起的光学性能影响。

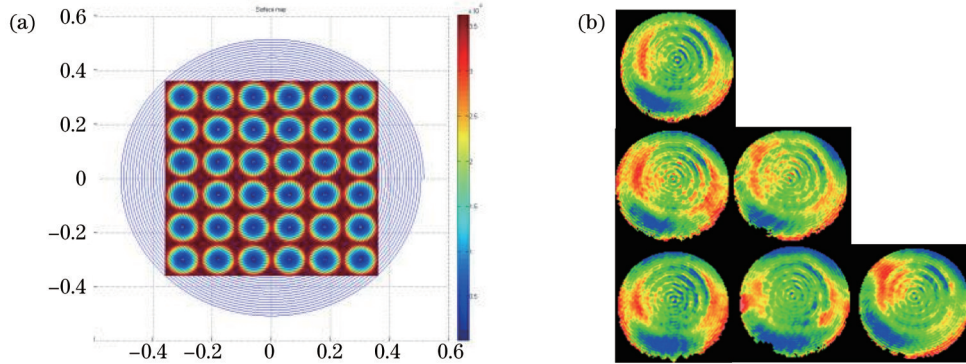


图1 研究对象。(a)微透镜阵列结构分布;(b)干涉仪测量得到的局部子眼面形误差分布

Fig.1 Research object. (a)Structural distribution of micro-lens array;(b) surface error distributions of parts of sub eyes measured by interferogram

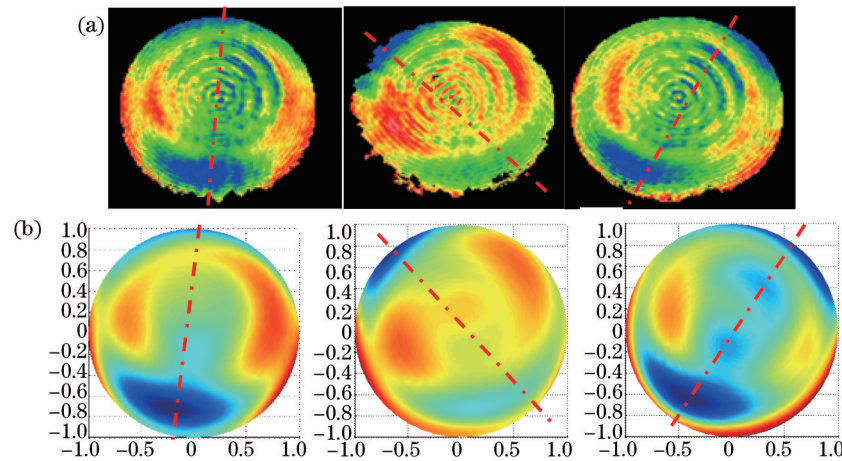


图2 (a) Zygo干涉仪测量得到的误差分布图;(b) Matlab中Zernike系数拟合得到的分布图

Fig.2 (a) Distribution diagrams of surface or wavefront measured with Zygo interferometer;

(b) distribution diagrams by Zernike polynomial coefficients fitting with Matlab

因此,需要建立合适的误差分析模型来分析面形误差对光学成像质量的影响规律,将测量的误差数据采用Zernike多项式进行表示,如图2(d)~(f)是三类误差分布的Zernike拟合分布图。图3表示误差分析模型的流程图,利用干涉仪进行面形误差和波前像差的测试,将Zernike多项式引入被测表面或者系统中,通过改变Zernike多项式系数,改变添加到透镜表面的误差形状。比较引入误差前后,波前像差、畸变、点列图、点扩展函数、调制传递函数等光学参数的变化情况,分析不同分布的面形误差对光学系统成像性能的影响规律。波前像差是光学性能的综合表现,而其他参数作为光学性能的具体体现,因此,在分析时将这两类光学性能参数分开。

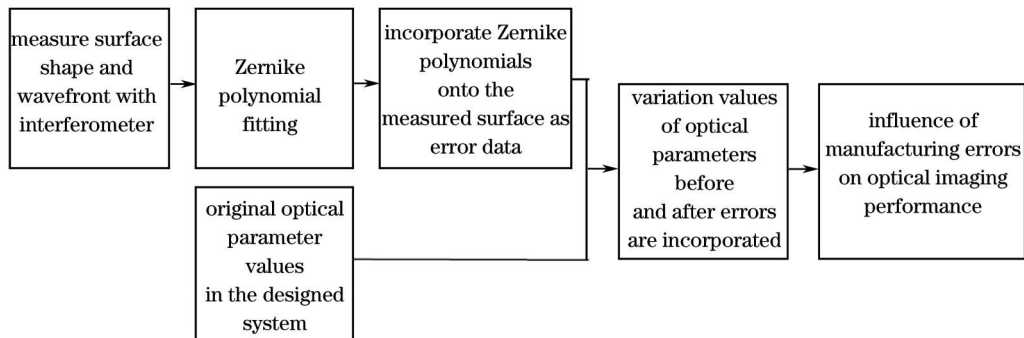


图3 误差分析模型流程图

Fig.3 Structure diagram of error analysis model

3 误差影响规律分析

3.1 对波前像差的影响

对于光学自由曲面来说,仍未有适应的波前像差理论,因此,建立面形误差与波前像差的映射关系是该步分析的关键。建立两者映射关系有两种方法,一种是借助光学软件添加面形误差直接得到波前像差变化情况,即光学仿真方法;另一种方法是推导建立两者的转换关系,即理论推导方法。相比之下,仿真方法不具普适性,对于每个面形或面形误差都需要单独处理。考虑模型的普适性,这里选择理论推导方法建立面形误差与波前像差的转换模型。假设面形误差与波前像差的转换关系如下式所示:

$$W = A \times S + W_0, \quad (1)$$

式中 W 为特定波长下光学系统的波前像差, A 为 36×36 的面形误差与波前像差之间的转换矩阵, S 为子眼表面的面形误差, W_0 为未添加面形误差时光学系统的波前像差。通过改变 36 项 Zernike 系数的每一项求取对应的波前像差的改变量,建立了面形误差与波前像差之间的转换矩阵,采用该方法,所得到的转换矩阵为可逆的非奇异方阵,由面形误差可以得到对应的波前像差,同理,由波前像差能得到唯一对应的面形误差,转换关系如下式所示:

$$S = A^{-1} \times (W - W_0). \quad (2)$$

矩阵 A 的各项控制 Zernike 不同项系数,而 Zernike 系数与相应的成像质量(初级/次级像差的球差、彗差、色差等)有关,利用矩阵指导相应成像误差的补偿。利用图 3 所示的误差分析模型,通过改变 36 项 Zernike 系数的每一项求取对应的波前像差的改变量,采用线性拟合的方式求得该光学系统下,面形误差与波前像差之间的转换矩阵 A 。

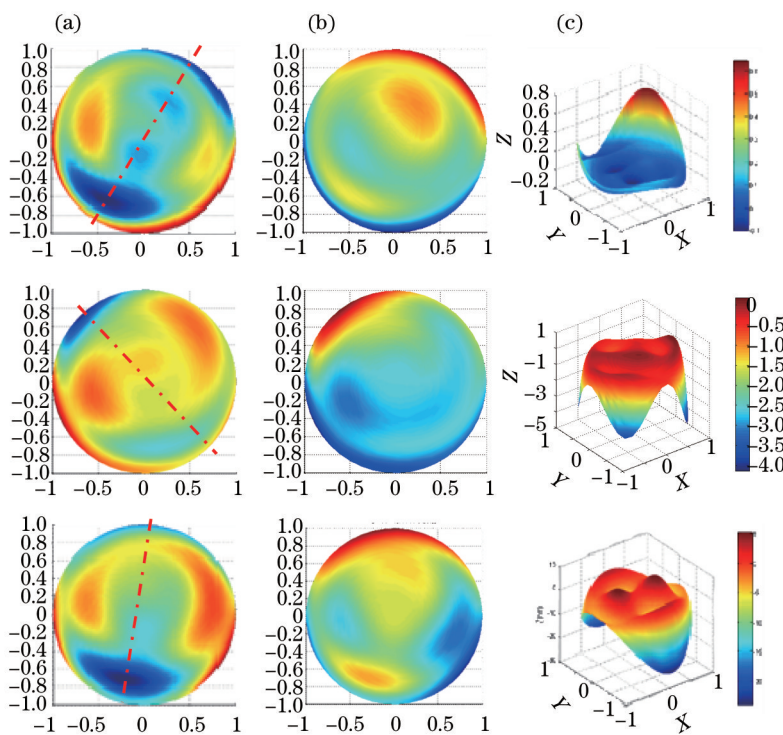


图 4 仿真与计算的波前像差之间的偏差。(a) 引入的面形误差;(b) 计算得到的波前像差;(c) 计算与实际的波前像差的差值。

Fig.4 Deviations between simulated and computational wavefront aberrations. (a) Incorporated surface error; (b) computational wavefront aberrations; (c) deviations between simulated and computational wavefront aberrations

利用 36×36 的可逆转换矩阵,将面形误差代入转换矩阵中,得到计算的波前像差,计算仿真与计算的波前像差之间的偏差,对转换矩阵进行逆运算,获得波前像差与面形误差的转换关系。将三种形状分布的面形误差(1,2,3)添加到仿真系统和(1)式中,得到相应面形误差下的波前像差,仿真得到的波前像差与通过转换矩阵计算得到的波前像差之间的偏差如图 4 所示,表 1 表示面形误差值和仿真与计算得到的波前像差之间的偏差值。可以发现偏差的峰谷值(PV)和 RMS 在纳米级范围内,因此,证明了建立面形误差与波前像差转换模型的正确性。

表 1 三种面形误差下仿真与计算的波前像差之间的误差数值

Table 1 Deviation values between simulated and computational wavefront aberrations corresponding to three surface error distributions

	Surface error value		Deviation value	
	PV / μm	RMS / μm	PV /nm	RMS /nm
Surface error 1	0.100	0.0386	17.486	2.133
Surface error 2	0.100	0.0176	4.294	0.584
Surface error 3	0.100	0.0191	7.465	0.801

采用该转换方法,计算的波前像差与实际波前像差的差别达到纳米级别。通过比较面形误差与对应波前像差的形状分布,波前像差与对应面形误差呈现高度值相反分布的趋势。

3.2 面形误差对光学参数的影响

光学系统的主要光学参数包括畸变、点列图、点扩展函数和光学传递函数等。其中,畸变反映的是光线经过光学系统后实际像高与近轴像高的差异;点列图是像面上像点所形成的弥散斑,弥散斑的大小可以衡量系统的像质优劣。点列图的弥散斑越小,接近于衍射极限,系统就越完善。RMS点列图反映不同视场角位置像点的均方根直径,100%点列图反映不同视场角下所含所有像点的直径;点扩展函数是研究光学传递函数的基础,它反映了成像光学系统对光束限制产生的衍射效应,是像面上形成弥散斑的光强分布。对于有像差的成像系统,点扩展函数是衍射极限和像差综合作用的结果;MTF为每毫米能分辨的线对数,反映光学系统的空间分辨能力。图2表示微透镜阵列三种面形误差分布形式,将上述面形误差添加到子眼表面,分析其对上述光学参数的影响。面形误差分布包括分布模式和数值大小两方面,在分析时需考虑这两方面的影响。

3.2.1 相同分布模式不同PV值误差

根据光学自由曲面加工经验,将PV值为0.1~0.6 μm 变化的面形误差(数据1~数据6)添加到设计的仿真系统中,得到相应的畸变、点列图、点扩展函数和光学传递函数的变化。图5显示了面形误差对畸变的影响。在相对高度较小位置(<0.3 相对高度),添加误差后畸变的变化率大;相对高度较大位置,畸变的变化率小。等比例地改变引入的面形误差,畸变在较低相对高度位置近似线性减小,引入面形误差使畸变得以改善,而在较高相对高度位置,畸变出现小幅度的增加,在这些位置畸变更为严重,但变化量小;图6表示添加面形误差后RMS点列图和100%点列图变化,可以看出,RMS点列图和100%点列图呈现递变的变化规律,并且在各视场角位置,点列图直径增加,反映出面形误差使光学系统在像面上形成的弥散斑尺寸,在各视场角位置均增大。如图7所示,在光学系统的子眼透镜表面添加PV值为0.2 μm 的面形误差,引入误差前后光强分布形状未发生明显变化,但是不同视场角下的二维光强分布形状与视场位置有明显的对应关系:(0,0)视场角位置形成一个理想的像点,(0,-7.8)和(0,7.8)位置光强分布存在对称关系,而(5.6,6.71), (5.6,-6.71), (-5.6,-6.71), (-5.6,6.71)4个视场角位置,点扩展函数分布于视场位置存在对应关系。图8表示面形误差对光学系统MTF的影响。引入亚微米量级的面形误差,对MTF影响效果显著,并且随着引入相同误差形式的面形误差PV值等比例增加,MTF也呈现近似比例的变化关系。在X方向,空间调制度在低频处减小,反映在低频处空间分辨能力下降;而在Y方向,空间调制度在低频位置增加,高频位置减小,反映光学系统在Y方向的低频分辨能力提高,高频分辨能力下降。

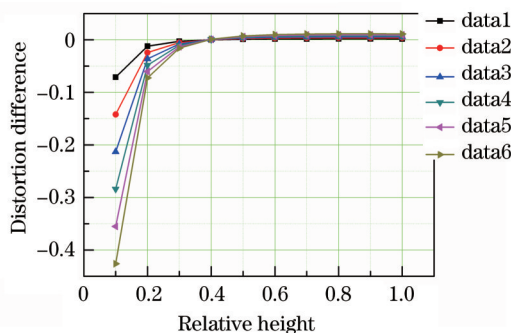


图 5 等比例地改变引入子眼表面的面形误差、畸变的变化率

Fig.5 Variation rates of distortion caused by surface errors attached to the 7 sub-eye surface with equal proportion

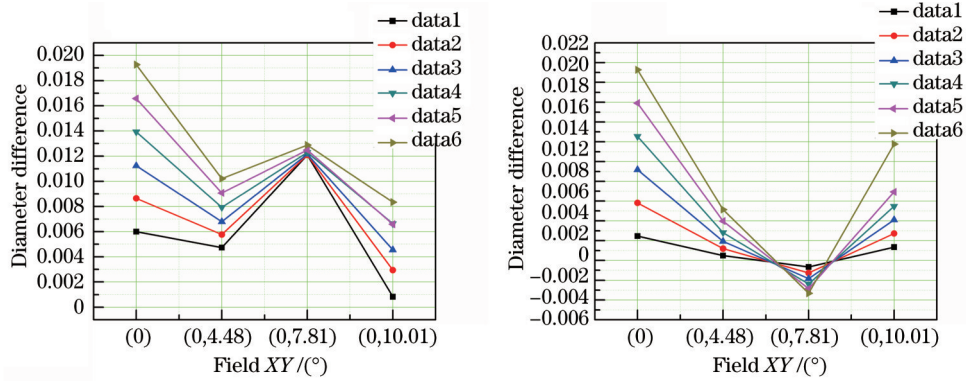


图 6 面形误差对点列图的影响。(a) RMS点列图; (b) 100%点列图
Fig.6 Influence on spot diagram caused by surface errors. (a) RMS spot diagram; (b) 100% spot diagram

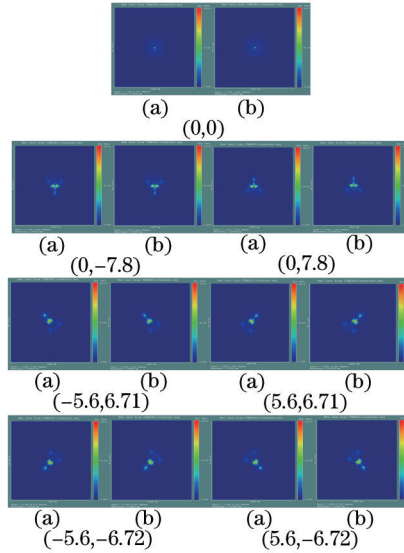


图 7 不同视场角下的点扩展函数。(a) 引入误差前各视场的点扩展函数; (b) 引入误差后的点扩展函数
Fig.7 PSF at different field angles. (a) PSF at different field angles before errors are introduced; (b) PSF at different field angles after errors are introduced

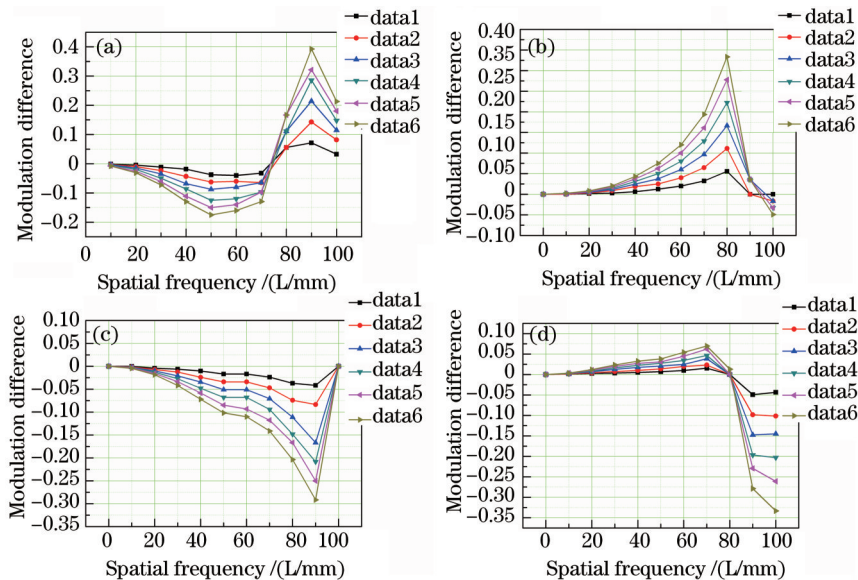


图 8 引入不同 PV 值, 相同面形误差形状的 MTF 变化。(a) (0,0) X 视场下 MTF 的变化; (b) (0,0)Y 视场下 MTF 的变化;
(c) (0,4.48) X 视场下 MTF 的变化; (d) (0,4.48) Y 视场下 MTF 的变化
Fig.8 Variation of MTF after importing surface error with different PV values, same surface shape. (a) Variation of MTF at the (0,0)X field; (b) variation of MTF at the (0,0)Y field; (c) variation of MTF at the (0,4.48)X field; (d) variation of MTF at the (0,4.48)Y field

如果引入面形误差或波前像差使得畸变减小,则实际光学系统成像更接近于理想成像,实际像高接近于理想像高;如果引入误差使得调制度提高,则该误差能改善光学元件空间分辨能力;反之,则降低元件的空间分辨能力。通过比较引入误差对于畸变和MTF的影响,尤其是对于较低相对位置 and 低频段的影响,可以分析引入的误差对于光学系统成像质量的影响。

3.2.2 相同PV值不同分布模式误差

由上述仿真结果可知,引入的误差在一些相对位置对于改善光学系统的畸变、像点尺寸和MTF有利,而在另一些位置降低了系统的光学性能。为了探寻何种分布形状的加工误差对于改善光学系统成像性能有利,在已经设计的子眼系统透镜表面添加三种不同分布情况的误差,量化反映引入误差前后畸变、点列图、调制传递函数的变化情况,分析不同的误差分布对于光学系统成像性能的影响。数据1、2、3分别对应高度分布向左,向右和中心对称的误差形状。

图9为畸变变化情况,可以看出在较低相对高度位置,数据2、3代表的面形误差使畸变减小,数据1代表的面形误差使畸变增大,但在较高相对高度位置,数据3对应的中心对称分布的面形误差形状使系统畸变增大。图10表示添加三种不同分布的面形误差对于点列图的影响。在不同视场角下,对于均方根点列图,数据1代表的向左对称分布的面形误差,使像面上弥散斑直径最小;对于100%点列图,数据1、3对应向左、中心对称分布的面形误差使弥散斑直径在不同视场角位置减小。综合考虑均方根和100%点列图直径,数据2代表的向右对称分布的面形误差对于像面上弥散斑的改善有利。图11表示添加三种不同分布的面形误差对于MTF的影响,可以发现,向左对称的误差使得X方向低频处调制度急剧降低,Y方向高频处调制度显著提高;中心对称分布的误差使X方向调制度提高,Y方向低频处调制度降低。向左和中心对称分布的面形误差只对某一特定方向上的MTF改善有利,而降低另一方向的空间分辨能力。数据2代表的对称轴向右对称分布的面形误差,在不同视场角和方向,对光学系统调制度的影响较平缓。

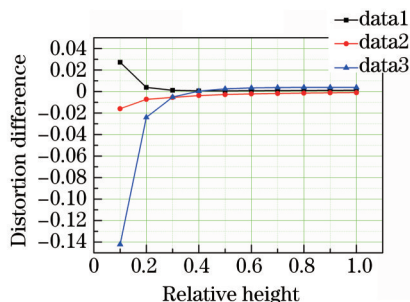


图9 三种面形误差对畸变的影响

Fig.9 Variation of distortion caused by three surface error distributions

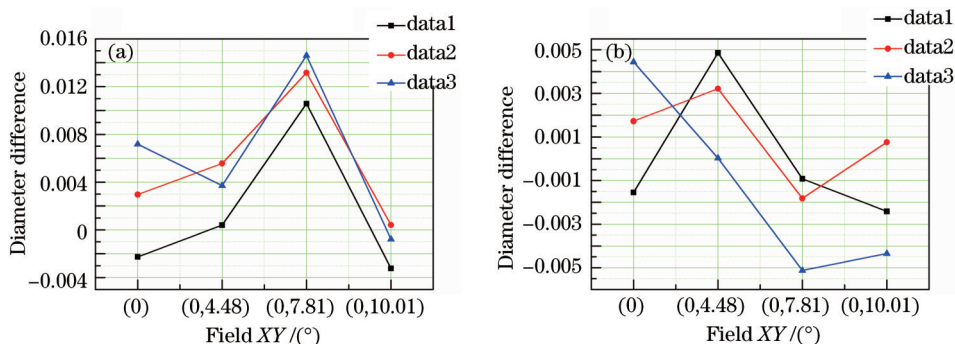


图10 三种面形误差对点列图的影响。(a) 三种面形误差对RMS点列图的影响;(b) 三种面形误差对100%点列图的影响

Fig.10 Influence on spot diagram caused by three surface error distributions. (a)Influence on RMS spot diagram; (b) influence on 100% spot diagram

4 结 论

基于微透镜阵列加工时的面形误差分布规律,分析了面形误差分布及量值对于光学性能的影响。通过改

变 36 项 Zernike 系数的每一项求取对应的波前像差的改变量,建立了面形误差与波前像差之间的转换矩阵,采用该方法,计算的波前像差与实际波前像差的差别达到纳米级别。通过比较面形误差与对应波前像差的形状分布,波前像差与对应面形误差呈现高度值相反分布趋势。为了形成加工误差对光学成像性能影响情况的完整评价,分别向光学系统子眼透镜表面引入向左,向右和中心对称分布的误差,比较引入误差前后畸变、点列图和 MTF 的变化情况。向左和中心对称分布的误差在部分视场角和空间位置能够改善光学性能,但是使另一部分相对位置的光学性能更严重。综合各相对位置光学参数的变化,向右对称分布的面形误差对于改善系统光学成像有利。由波前像差理论确定成像质量评价参数和面形补偿量的关系,在超精密加工过程中通过对加工路径进行补偿,对真正实现光学自由曲面成像质量可控制造提供理论依据。

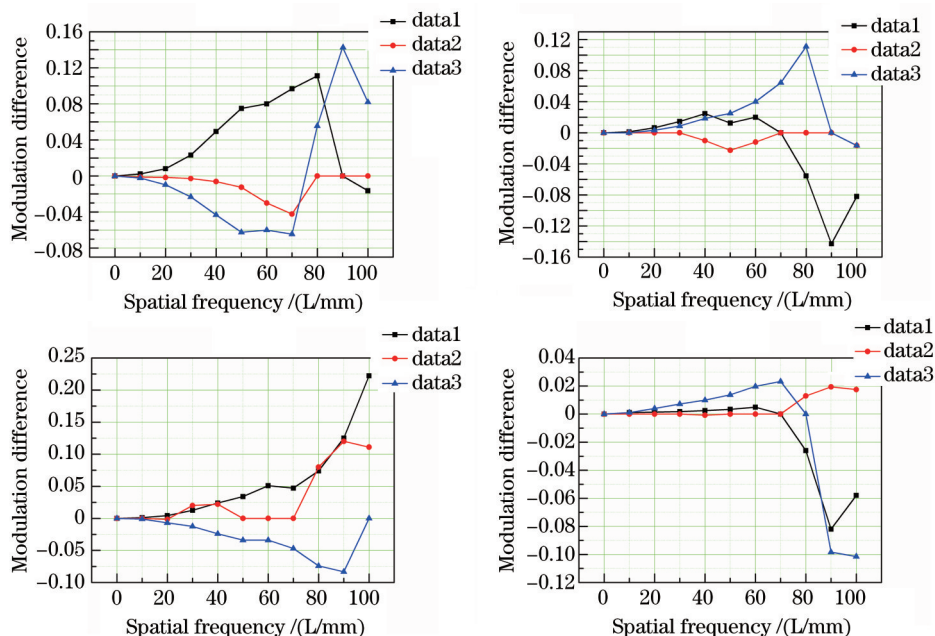


图 11 不同视场角下 MTF 的变化。(a) (0,0)X 视场下 MTF 的变化; (b) (0,0)Y 视场下 MTF 的变化;
(c) (0,4.48)X 视场下 MTF 的变化; (d) (0,4.48)Y 视场下 MTF 的变化

Fig.11 Variation of MTF at different fields. (a) Variation of MTF at the (0, 0)X field; (b) variation of MTF at the (0, 0)Y field;
(c) variation of MTF at the (0, 4.48)X field; (d) variation of MTF at the (0, 4.48)Y field

参 考 文 献

- Xu Yan, Yan Shuhua, Zhou Chunlei, *et al.*. Advances in bionic study on insects' compound eyes[J]. Optical Technique, 2006, 32 (s): 10-12.
徐 琰, 颜树华, 周春雷, 等. 昆虫复眼的仿生研究进展[J]. 光学技术, 2006, 32 (s): 10-12.
- Di Si, Xu Hongkui, Du Ruxu. New progress of artificial compound eye imaging systems[J]. Opt & Optoelectronic Technology, 2008, 6 (4):94-96.
邸 思, 徐洪奎, 杜如虚. 人造复眼成像系统研究的新进展[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4):94-96.
- Liu Zhihui, Yang Huan, Shi Zhendong, *et al.*. Homogenization of the semiconductor laser planar array using diffractive micro-lens array [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102005.
刘志辉, 杨 欢, 石振东, 等. 衍射微透镜阵列用于面阵半导体激光光束匀化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102005.
- Tanida J, Kumagai T, Yamada K, *et al.*. Thin observation module by bound optics (TOMBO): an optoelectronic image capturing system [C]. 2000 International Topical Meeting on Optics in Computing (OC2000). International Society for Optics and Photonics, 2000: 1030-1036.
- Tanida J, Kitamura Y, Yamada K, *et al.*. Compact image capturing system based on compound imaging and digital reconstruction[C]. International Symposium on Optical Science and Technology. International Society for Optics and Photonics, 2001: 34-41.
- Tanida J, Kumagai T, Yamada K, *et al.*. Thin observation module by bound optics (TOMBO): concept and experimental verification[J]. Appl Opt, 2001, 40(11): 1806-1813.

- 7 Duparré J, Radtke D, Tünnermann A. Spherical artificial compound eye captures real images[C]. MOEMS-MEMS 2007 Micro and Nanofabrication. International Society for Optics and Photonics, 2007: 64660K.
- 8 Radtke D, Duparré J, Zeitner U D, *et al.*. Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. Opt Express, 2007, 15(6): 3067-3077.
- 9 Di Si, Du Ruxu. Optimal design of single-layer spherical compound eye imaging system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(2): 27-31.
- 邸 思, 杜如虚. 单层曲面复眼成像系统的优化设计[J]. 光电工程, 2010, 37(2): 27-31.
- 10 Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Wang Ruiting, *et al.*. Study on curved compound eye imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 346-350.
- 张红鑫, 卢振武, 王瑞庭, 等. 曲面复眼成像系统的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 346-350.
- 11 Radtke D, Duparré J, Zeitner U D, *et al.*. Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye[J]. Opt Express, 2007, 15(6): 3067-3077.
- 12 Jeong K H, Kim J, Lee L P. Biologically inspired artificial compound eyes[J]. Science, 2006, 312(5773): 557-561.
- 13 Zhong Kejun, Gao Yiqing, Li Feng, *et al.*. A method of fabricating concave polydimethylsiloxane microlens array[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0310002.
- 钟可君, 高益庆, 李 凤, 等. 一种制作凹形聚二甲基硅氧烷微透镜阵列的方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0310002.
- 14 He Qiqiang. Study on Computer Controlled Atmospheric Plasma Optical Processing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010, 34-37.
- 贺启强. 计算机控制大气等离子体光学加工方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010, 34-37.
- 15 Radtke D, Zeitner U D. Laser-lithography on non-planar surfaces[J]. Opt Express, 2007, 15(3): 1167-1174.
- 16 Tohme Y. Trends in ultra-precision machining of freeform optical surfaces[C]. Optical Fabrication and Testing, 2008: OThC6.
- 17 Lu X, Trumper D L. Spindle rotary position estimation for fast tool servo trajectory generation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(9): 1362-1367.
- 18 Yi A Y, Li L. Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo[J]. Opt Lett, 2005, 30(13): 1707-1709.
- 19 Li L, Yi A Y. Development of a 3D artificial compound eye[J]. Opt Express, 2010, 18(17): 18125-18137.
- 20 Zhang X, Fang F, Yu L H, *et al.*. Slow slide servo turning of compound eye lens[J]. Optical Engineering, 2013, 52(2): 023401.
- 21 Xu Qiao, Ye Jun, Bao Zhengkang, *et al.*. The comprehensive performance test of melt microlens array[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1996, 17 (S1): 125-128.
- 许 乔, 叶 钧, 包正康, 等. 热熔微透镜阵列的综合性能测试[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(S1): 125-128.
- 22 Reichelt S, Zappe H. Combined twyman-green and mach-zehnder interferometer for microlens testing[J]. Appl Opt, 2005, 44(27): 5786-5792.
- 23 Zhu Xianchang. Research on Focal Length and Consistency Measurement of Microlens-Array[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- 朱咸昌. 微透镜阵列焦距及其一致性检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2013.
- 24 Tian Dalei, Guan Rongfeng, Wang Xin, *et al.*. Studies on the optical properties of LED based on microlens array[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2009, 30(1): 69-72.
- 田大垒, 关荣锋, 王 杏, 等. 基于微透镜阵列的 LED 光学性能[J]. 发光学报, 2009, 30(1): 69-72.
- 25 Wang Yan. Wavefront Aberration and Clinical Visual Correction[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011.
- 王 雁. 波前像差与临床视觉矫正[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2011.
- 26 Zhu Jin. Research on Surface Shape Description Method and Ray Tracing Model of Optical Freeform Surfaces[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- 朱 进. 光学自由曲面面形描述方法和光线追迹模型的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.

栏目编辑: 韩 峰