

基于相位测量偏折术的成像透镜轴外点波像差测量

阮一郎¹, 李大海^{1,2*}, 余林治¹, 张新伟¹, 肖翔天¹¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065;²四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都 610065

摘要 提出了一种测量成像透镜轴外点波像差的方法。基于逆哈特曼原理建立了逆光线追迹模型, 通过标定的系统参数, 测量了透镜轴外视场点的波像差。通过模拟和实验, 对该方法进行了验证, 并对实验误差进行了分析。实验测量了有效孔径为 60 mm 的平凸透镜在不同视场下的波像差, 将实验结果和模拟结果进行了对比分析, 并且分析了轴外点初级像散和初级彗差随视场和入瞳孔径的变化规律。该方法具有测量动态范围大、测量系统结构简单、实验设备成本低廉、测量环境易实现等优点, 并且无需复杂的相机标定过程, 为透镜的轴外点波像差测量提供了一个可行方案。

关键词 测量; 透射波前检测; 相位测量偏折术; 波像差; 轴外点

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL202249.2104003

1 引言

成像透镜作为一种精密光学器件, 在显微镜^[1]、相机^[2]、激光器^[3]等领域中有着广泛的应用。光学行业快速发展, 对成像透镜的需求量越来越大, 迫切需要一种方便、快捷且高效的检测透镜波像差的方法, 以评估其成像质量。目前像差检测方法可以分为两大类。第一类是通过测量光程差来检测波像差的干涉法, 如 Twyman-Green 干涉仪和 Fizeau^[4]干涉仪。干涉检测法的测量精度高, 但其对环境敏感, 动态范围低, 价格昂贵, 不适合在线检测, 且无法对轴外点像差进行有效测量。第二类是通过测量波前斜率来检测波像差的几何法, 如哈特曼波前探测法^[5]、夏克-哈特曼检测^[6-7]、朗奇检测^[8-9]、莫尔偏折术检测^[10-11]等。其中, 哈特曼波前探测法和夏克-哈特曼检测的精度受限于微透镜阵列中微透镜的尺寸和加工工艺, 且恢复的波前分辨率低。朗奇检测法只能测量低阶像差, 无法对波前进行全面评价。而莫尔偏折术检测法的精度依赖于光栅质量。

相位测量偏折术(PMD)是一种与相移技术相结合的高精度光学元件面形检测技术, 该技术由于设备简单、测量精度高、动态范围大以及检测速度快等优点, 得到了广泛的应用。Canabal 等^[12]提出了基于从相位变化梯度数据到波前斜率的转换, 利用波前斜率重建透射元件波前的方法。但是该方法没有准确标定

系统参数, 不能定量测量波前, 只能定性分析。Jiang 等^[13]提出了一种利用偏折术测量单透镜波像差的方法, 但是该方法的标定过程较复杂, 且测量过程中需要通过移动显示器来标定光线方向, 结果包含机械结构误差。Wang 等^[14]利用计算机辅助偏折术实现了大像差透射元件的波前测量, 但是该方法的迭代过程耗时长, 难以用于在线检测。且上述方法均都没有对成像透镜的轴外点波像差进行有效测量。

为了对成像透镜轴外点波像差进行高精度检测, 本文提出了一种基于 PMD 的波像差测量方法。搭建了 PMD 测量系统, 结合条纹投影和相移技术得到了显示器坐标。再利用标定的系统参数在计算机中建立了待测透镜光路模型, 通过光线追迹得到出瞳坐标和理想像点坐标。由显示器坐标、出瞳坐标以及理想像点坐标可计算得到波像差。该方法原理简单, 仅需一台液晶显示器(LCD)和一台电荷耦合器件(CCD)相机就可以测量成像透镜轴外视场点的波像差。文章第二节介绍了几何光学中透镜轴外点波像差的定义, 并提出了以逆光线追迹得到波像差的方法。第三节模拟了平凸透镜在不同视场角下的正向追迹波像差和逆向追迹波像差, 并模拟了逆向波像差中初级像散和初级彗差随视场和入瞳孔径的变化情况, 根据模拟结果分析了逆向波像差代替正向波像差的可行性。第四节通过实验测量了有效孔径为 60 mm 的平凸透镜在不同视场下的波像差, 并

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-02-23; 录用日期: 2022-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20215, 61875142)、四川大学基金(2020SCUNG205)

通信作者: *lidahai@scu.edu.cn

将实验结果与模拟结果进行了对比分析,同时测量了该透镜的初级像散和初级彗差。第五节对本文所提方法进行了总结。

2 基本原理

2.1 波像差的逆追迹计算模型

轴外点波像差定义如图 1 所示,平面光波 Σ_0 入射透镜后,从出瞳出射的波前在理想情况下是以理想像点为圆心,以出瞳中心到理想像点的距离为半径的标准球面波(Σ_p),其中球面波半径为 R 。然而,由于透镜存在像差,实际出射波前(Σ_r)产生畸变,理想波前 Σ_p 和实际波前 Σ_r 相交于出瞳中心 O 。AA' 是该光路中某一条有像差的实际光线,其与波前 Σ_p 和 Σ_r 分别交于 P_1 点和 P_2 点,与透镜焦平面($x_i y_i$ 平面)交于点 A' 。波像差定义为 P_1 到 P_2 的光程,该光程是出瞳坐标的函数,可以表示为 $w(x, y)$ 。光线 AA'' 是理想情况下的光线,其与透镜焦平面交于点 A'' 。A' 和 A'' 在

x, y 方向的距离分别为 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_x$ 和 ϵ_y 为垂轴像差。波像差和垂轴像差的关系^[15]为

$$\begin{cases} \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} = -n' \cdot \frac{\epsilon_x}{R - w(x, y)}, \\ \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} = -n' \cdot \frac{\epsilon_y}{R - w(x, y)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $w(x, y)$ 是出瞳位置 (x, y) 处的波像差; n' 是像空间的折射率。由于波像差 $w(x, y)$ 与参考球面波半径 R 相比可以忽略不计,假设像空间介质折射率 $n'=1$, 所以式(1)可以近似为

$$\begin{cases} \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} = -\frac{\epsilon_x}{R} = -S_x, \\ \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} = -\frac{\epsilon_y}{R} = -S_y \end{cases}, \quad (2)$$

式中: S_x 和 S_y 分别为光线在 x 方向和 y 方向上的角像差。对所有光线进行测量,得到其 S_x 和 S_y , 再通过积分^[16-17]可拟合得到波像差 $w(x, y)$ 。

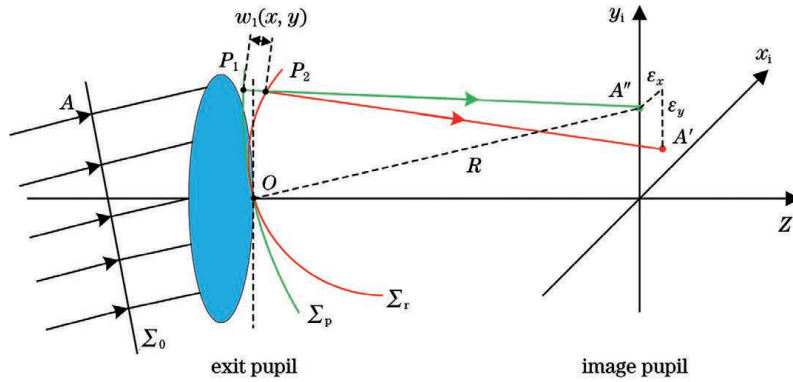


图 1 轴外点波像差几何示意图

Fig. 1 Geometry diagram of off-axis wave aberration

我们将图 1 所示的光路追迹模型称为正追迹模型。为了得到该透镜的波像差,本文建立了图 2 所示的逆追迹模型示意图。在逆追迹模型中,点光源 A'' 和正追迹模型中的理想像点 A'' 为同一位置,且逆追迹模型中的出瞳位置对应正追迹模型中的入瞳位置^[18]。在逆追迹模型中,所有光线从 A'' 发出,经透镜折射后到达接收面。由于点光源在透镜

焦平面上,因此其发出的球面波 Σ_0 通过透镜后,理想出射光波为平面波 Σ_p , 然而实际出射光波由于像差的影响会是非平面波 Σ_r , 理想波前 Σ_p 和实际畸变波前 Σ_r 相交于出瞳中心。对于透镜出瞳面上同一个出射点 $P(x_p, y_p, z_p)$, 畸变波前和理想波前对应的光线与像面相交于不同位置,即实际像点 $B'(x_{B'}, y_{B'}, z_{B'})$ 和理想像点 $B''(x_{B''}, y_{B''}, z_{B''})$ 。此

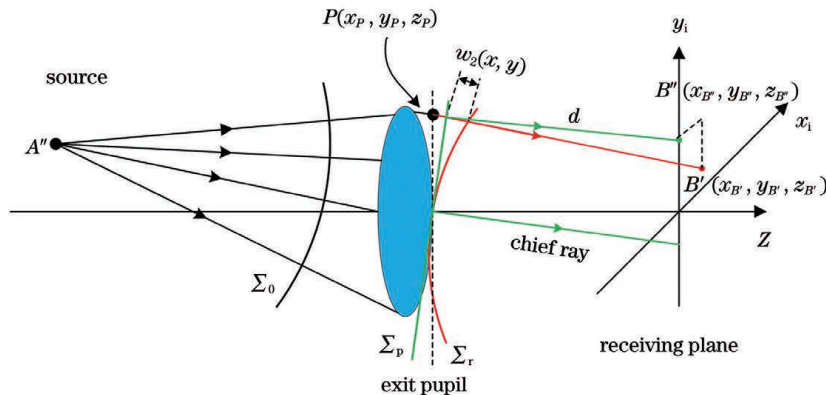


图 2 轴外点波像差的逆光路模型

Fig. 2 Model of reversed optical path for off-axis wave aberration

时,将出瞳上点 P 到理想像点的距离定义为 d ,根据理想像点 B'' 、实际像点 B' 的位置以及距离 d ,计

算点 A'' 的角像差,再将角像差进行积分,进而得到波像差。

$$\begin{cases} \frac{\partial w(x,y)}{\partial x} = -\frac{\epsilon_x}{d} = -\frac{x_{B'} - x_{B''}}{\sqrt{(x_{B'} - x_P)^2 + (y_{B'} - y_P)^2 + (z_{B'} - z_P)^2}} = -S_x \\ \frac{\partial w(x,y)}{\partial y} = -\frac{\epsilon_y}{d} = -\frac{y_{B'} - y_{B''}}{\sqrt{(x_{B'} - x_P)^2 + (y_{B'} - y_P)^2 + (z_{B'} - z_P)^2}} = -S_y \end{cases} \quad (3)$$

我们将通过正追迹模型得到的波像差称为正向波像差,即传统的波像差,用 $w_1(x,y)$ 表示。将通过逆追迹模型得到的波像差称为逆向波像差,用 $w_2(x,y)$ 表示。逆向波像差 $w_2(x,y)$ 与正向波像差 $w_1(x,y)$ 的实际路径略有差异,但它们的差相较于波像差本身极小,因此可以用逆向波像差代替正向波像差。

2.2 透射 PMD 测量轴外点波像差模型

基于上述波像差的逆追迹测量原理,现可用 PMD 系统来测量成像透镜轴外点波像差。本文提出的基于 PMD 的透镜轴外点波像差测量系统模型如图 3 所示,该系统由一台 LCD 显示器、一台外置针孔的 CCD 相机以及待测透镜组成。透镜放在显示器与针孔相机之间,相机针孔位于透镜后焦平面上,且针孔与被测透镜

光瞳中心的连线与透镜光轴的夹角为 θ ,该夹角是某待测轴外视场点的视场角。显示器上显示计算机编码形成的正弦条纹图,该条纹图经过透镜折射后被针孔相机捕获。基于逆光线追迹的逆哈特曼原理,可认为光线从相机针孔发出,通过透镜后带有像差的实际光线如图 3 中 I_1 所示,而理想情况下的出射光线为 I_2 。通过相移算法和相位展开算法可以得到显示器各点的实际坐标,即实际光线 I_1 与显示器的交点坐标 $B'(x_{B'}, y_{B'}, z_{B'})$ 。然后在计算机中建立待测透镜光路模型,通过光线追迹可以得到出瞳坐标 $P(x_P, y_P, z_P)$ 以及理想光线 I_2 和显示器的交点坐标 $B''(x_{B''}, y_{B''}, z_{B''})$ 。再通过式(3)得到波前斜率,最后对波前斜率进行积分得到波像差。

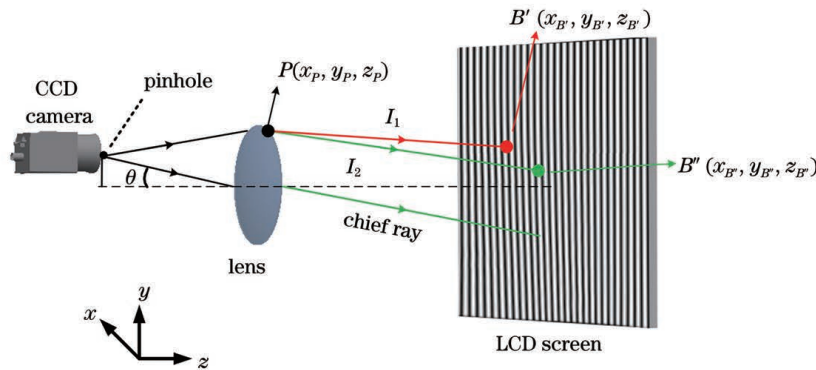


图 3 基于相位测量偏折术的轴外点波像差测量系统

Fig. 3 Off-axis point wave aberration measurement system based on PMD

3 模拟仿真

建立图 1 所示的正光路模型,利用光线追迹可以得到实际光线与透镜焦平面的交点 A' ,再通过近轴光线追迹可得到理想像点 A'' ,参考球面波半径 R 为出瞳中心 O 到理想像点 A'' 的距离。分别将 A' 坐标、 A'' 坐标以及 R 代入式(2)得到的波前斜率,再积分得到正向波像差。利用 2.2 节中所提方法,建立图 2 所示的逆光路模型,通过光线追迹得到实际出射光线与出瞳面交点 P 以及实际出射光线与像面交点 B' ,再通过近轴光线追迹得到理想像点 B'' , d 为出瞳上的点 P 到理想像点 B'' 的距离。分别将 B' 坐标、 B'' 坐标以及 d 代入式(3)可得到逆追迹的波前斜率,再积分可得到逆向波像差。通过对比正向波像差和逆向波像差,可以验证用逆向波像差代替正向波像差的可行性。

模拟的成像透镜为平凸透镜,该透镜的凸面曲率半径为 258.4 mm,孔径为 75 mm,中心厚度为 8 mm,后焦距为 494.7 mm,透镜材料为 BK7 玻璃。正追迹过程中光线先到达透镜凸面,经透镜折射后从透镜平面出射到达像面。逆追迹过程为光线先到达透镜平面,经透镜折射后从透镜凸面出射。将透镜孔径光阑设置在透镜平面上,通过孔径光阑的物像关系可以得到平凸透镜的入瞳和出瞳面位置。由于该透镜是旋转对称的,因此只需计算轴外视场点子午面内的光线方向,进而得到透镜轴外点的波像差信息。模拟过程中视场与 y 轴正方向的夹角分别为 0° 、 3° 和 5° (半视场角),用模式法拟合波像差,分别得到不同视场的正向波像差、逆向波像差以及两者之差,模拟结果如图 4 所示,其对应波前的均方根(RMS)和峰谷(PV)值如表 1 所示。

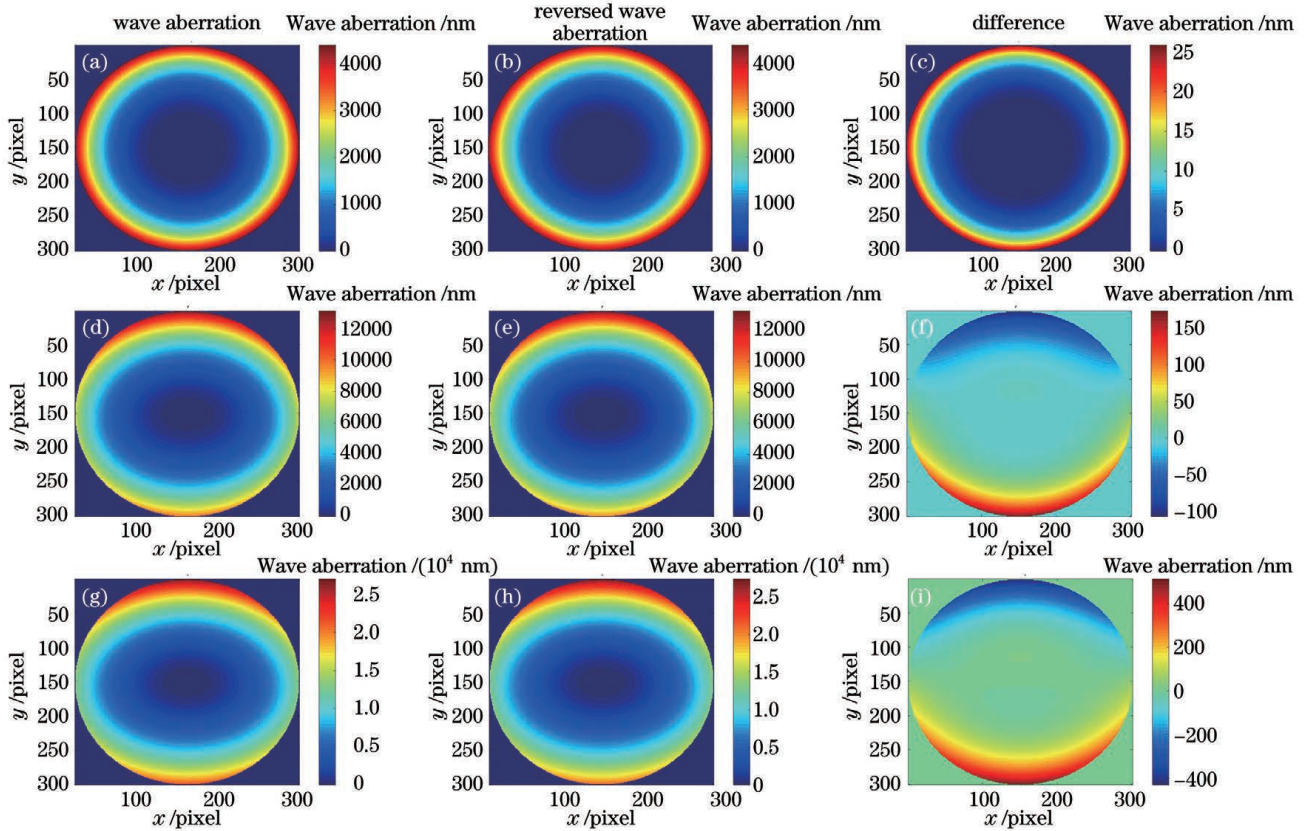


图 4 平凸透镜分别在不同视场下的正向波像差、逆向波像差以及两者之差。(a)~(c)0°半视场;(d)~(f)3°半视场;(g)~(i)5°半视场

Fig. 4 Forward wave aberrations, reversed wave aberrations and their differences of plano-convex lens at different fields.

(a)–(c) 0° half field angle; (d)–(f) 3° half field angle; (g)–(i) 5° half field angle

表 1 正向波像差和逆向波像差在不同视场角下的 RMS 以及 PV 值

Table 1 RMS and PV values of forward and reversed wave aberrations at different field angles

Aberration	0°	3°	5°
Forward wave aberration	RMS of 1311.1 nm, PV of 4403.2 nm	RMS of 2946.6 nm, PV of 12140.9 nm	RMS of 5944.6 nm, PV of 27002.8 nm
Reversed wave aberration	RMS of 1303.9 nm, PV of 4377.4 nm	RMS of 2946.1 nm, PV of 13248.7 nm	RMS of 5958.7 nm, PV of 27436.0 nm
Difference	RMS of 7.3 nm, PV of 25.8 nm	RMS of 43.2 nm, PV of 281.1 nm	RMS of 144.6 nm, PV of 949.1 nm

从该透镜模拟结果可以看出,虽然正逆追迹波像差并不完全相等,但是正、逆波像差分布基本一致,且正、逆波像差之差的 RMS 和 PV 值均比较小。在半视场角为 5° 的情况下,正、逆向波像差之差的 RMS 误差为 2.43%,PV 误差为 3.51%。而当半视场角增加到 10° 时,RMS 误差也仅为 4.94%,PV 误差为 7.21%,这主要是由正、逆光路差异引起的。考虑到实验中我们所用的相机视场范围有限,因此这里仅给出平凸透镜在 5° 以内视场角下的波像差情况。

将模拟得到的波像差用 Zernike 多项式进行分解,图 5 给出了该平凸透镜在 5° 半视场角下的正、逆波像差的第 5~21 项的 Zernike 系数对比,可以看出,正、逆波像差 Zernike 多项式前 11 项系数都很接近,

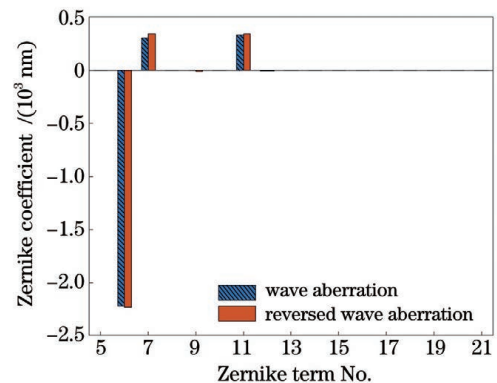


图 5 平凸透镜在 5° 半视场角下的正、逆波前像差的

Zernike 系数对比

Fig. 5 Zernike coefficient comparison between wave aberration and reversed wave aberration of plano-convex lens at 5° half field angle

且高阶项系数非常小,可以忽略。

对于轴外视场,波像差主要表现为像散、彗差、场曲和畸变,下面将继续分析本文方法用于测量成像镜头的初级像散和初级彗差的情况。像散和彗差都是视场和入瞳孔径的函数,根据初级像差理论,初级像散和初级彗差^[19]可以表示为

$$\begin{cases} W_a = W_{222} H^2 \rho^2 \cos^2 \theta' \\ W_c = W_{131} H \rho^3 \cos \theta' \end{cases}, \quad (4)$$

式中: W_a 表示初级像散波像差; W_{222} 表示初级像散系数; W_c 表示初级彗差波像差; W_{131} 表示初级彗差系

数; H 表示归一化视场; ρ 表示归一化入瞳孔径; θ' 表示方位角,它是光线在入瞳面上的入射点与 y 轴间的夹角。式(4)反映了初级像散与视场以及入瞳孔径的二次方相关,初级彗差与视场的一次方以及入瞳孔径的三次方相关。为了探究本文提出的逆向波像差是否也满足该变化规律,开展了以下模拟实验,分别验证逆向波像差中初级像散和初级彗差随视场以及入瞳孔径的变化规律。用初级像散系数 W_{222} 表征像散大小,用初级彗差系数 W_{131} 表征彗差大小。Zernike 像差系数和初级像差系数的转换关系^[4]为

$$\begin{cases} W_{222} = 2\sqrt{6}c_{22} - 6\sqrt{10}c_{42} + 12\sqrt{4}c_{62} \\ W_{131} = 6\sqrt{2}c_{31} - 6\sqrt{2}c_{33} - 24\sqrt{3}c_{51} + 24\sqrt{3}c_{53} + 120c_{71} - 120c_{73} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: c_{nm} 表示 Zernike 相关项系数,其中 n 表示多项式的阶数, m 表示方位角频率。根据(5)式将 Zernike 多项式系数转换成初级像差系数。本文使用的是 Zernike 圆多项式编号,模拟的平凸透镜视场在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内均匀变化,最大视场为 5° ,被划分成 10 个不同视场。模拟的入瞳孔径在 $0 \sim 75$ mm 范围内均匀变化,最大入瞳孔径为 75 mm,被划分成 10 个不同孔径。将视场和孔径归一化,得到最大入瞳孔径下平凸透镜逆向波像差中的初级像散系数 W_{222} 和初级彗差系数 W_{131} 随归一化视场的变化规律,如图 6(a)所示。最大视场下 W_{222} 和 W_{131} 随归一化入瞳孔径的变化规律如图 6(b)所示。用线性最小

二乘法拟合 10 个数据点,其中 W_{222} 随 H 和 ρ 的变化规律用二次多项式进行拟合, W_{131} 随 H 的变化规律用一次多项式进行拟合, W_{131} 随 ρ 的变化规律用三次多项式进行拟合,得到的拟合曲线如图 6 所示。可以看出,曲线的变化趋势符合式(4)中像散和彗差随视场和孔径的变化规律,即逆向波像差中的像散是视场[图 6(a)实线]和孔径[图 6(b)实线]的二次函数,彗差是视场[图 6(a)虚线]的一次函数、孔径[图 6(b)虚线]的三次函数,这一结果进一步验证了逆向波像差代替正向波像差的可行性。此外,还分析了高阶像差的检测情况,结果也证明了该方法的有效性。

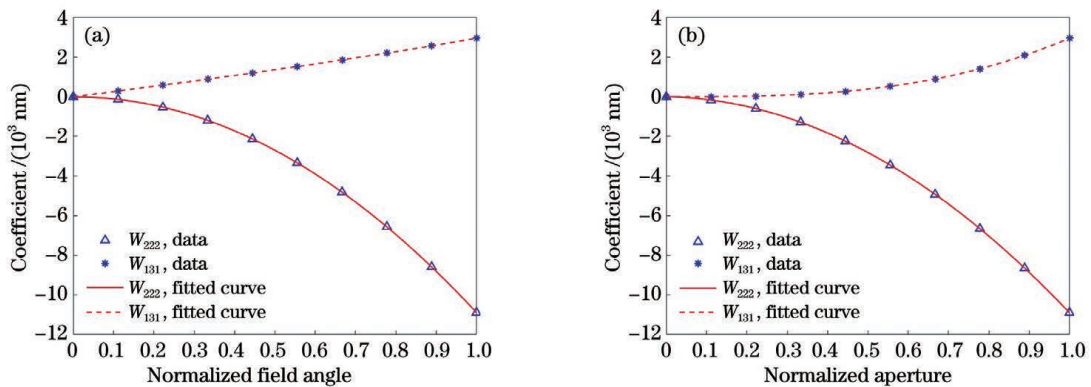


图 6 不同条件下的平凸透镜初级彗差和像散系数。(a)不同视场角(孔径为 75 mm);(b)不同孔径(视场角为 5°)

Fig. 6 Coefficients of primary coma and astigmatism of plano-convex lens under different conditions. (a) Different field angles with aperture of 75 mm; (b) different apertures with field angle of 5°

4 实 验

为了验证本文提出的方法在实际测量中的可行性,搭建了图 7(a)所示的透镜波像差测量系统。显示器显示计算机编码生成的正弦条纹图,待测透镜置于显示器前方,调整相机光轴与显示器垂直。待测透镜参数与模拟参数完全一致,只有测量孔径不同,实验中待测平凸透镜的最大可测量有效孔径为 60 mm,如图 7(b)所示,其中虚线圆形区域表示实验可测量的最

大区域。透镜平面朝向相机针孔,凸面朝向显示器,透镜的平面为孔径光阑面。相机针孔和透镜平面之间的距离为 497.400 mm,透镜凸面和显示器之间的距离为 703.672 mm。显示器分辨率为 1600×1200 ,像素大小为 $0.2705 \text{ mm} \times 0.2705 \text{ mm}$ 。相机分辨率为 1296×966 ,像素大小为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 。

实验中,相机先拍摄经过透镜的畸变条纹图[图 8(a)],通过相移算法和相位展开算法得到待测区域[图 8(a)中虚线区域]的相位,进而得到真实光线和

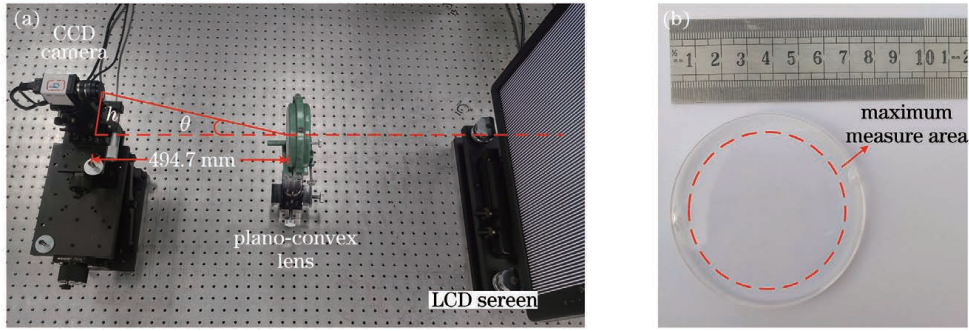


图 7 实验装置。(a)测量装置图;(b)待测平凸透镜

Fig. 7 Experimental devices. (a) Diagram of measuring device; (b) plano-convex lens to be measured

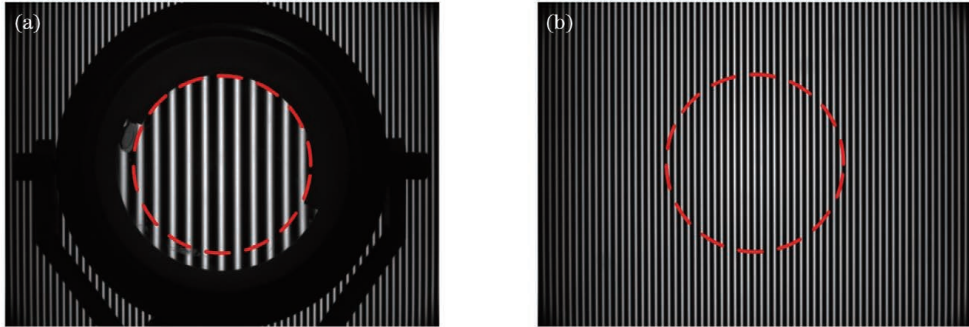


图 8 采集得到的条纹图。(a)加装了透镜的条纹图;(b)空载条纹图

Fig. 8 Acquired fringe patterns. (a) Fringes with lens; (b) fringes without lens

显示器的交点坐标 $B'(x_{B'}, y_{B'}, z_{B'})$ 。再拍摄空载条件下的条纹图[图 8(b)],处理相同区域[图 8(b)中虚线区域],得到空载时显示器坐标 (x_n, y_n, z_n) ,结合相机针孔位置 (x_c, y_c, z_c) ,标定出光线方向 $\mathbf{D}(K, L, M)$:

$$\begin{cases} K = \frac{x_n - x_c}{\sqrt{(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2}} \\ L = \frac{y_n - y_c}{\sqrt{(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2}} \\ M = \frac{z_n - z_c}{\sqrt{(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: K 、 L 和 M 分别为光线沿 x 、 y 和 z 方向的方向余弦。

接下来利用光线方向 $\mathbf{D}(K, L, M)$ 以及带有千分尺的点光源显微系统测得的实验系统参数,在计算机

中建立 PMD 模型,然后通过光线追迹方法得到出瞳坐标 $P(x_P, y_P, z_P)$ 和理想像点坐标 $B''(x_{B''}, y_{B''}, z_{B''})$ 。将实际像点坐标 $B'(x_{B'}, y_{B'}, z_{B'})$ 、理想像点坐标 $B''(x_{B''}, y_{B''}, z_{B''})$ 和出瞳坐标 $P(x_P, y_P, z_P)$ 代入式(3)中,求出角像差即波前斜率,再通过积分可得到透镜的波像差。

实验中外置针孔的相机被放在透镜后焦平面上,且针孔偏离光轴一定距离 h 。受相机与显示器参数限制,相比往竖直方向平移,相机往水平方向平移可以获得更大视场,所以实验中相机离轴方向为水平方向。为了与模拟过程保持一致,实验中定义 y 轴沿水平方向, x 轴沿竖直方向。相机初始离轴量 $h=0$,离轴距离每次增加 5 mm,一共移动 9 次,最大离轴距离为 45 mm,对应半视场角为 5.17° ,共测量 10 个视场的波像差情况。图 9 显示了离轴量从 0 变化到 45 mm

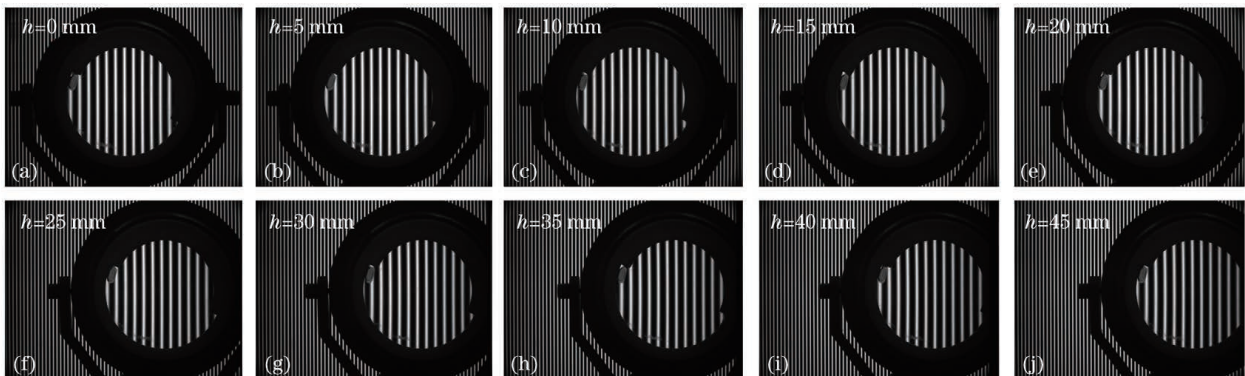


图 9 不同视场下的透射条纹图

Fig. 9 Transmission fringe images under different fields of view

的过程中相机拍摄到的图片。

实验测得的 10 个不同视场波像差用 Zernike 多项式进行分解。当离轴量分别为 0、25、45 mm (分别对应轴外 0°、2.88°、5.17° 半视场角) 时, 三个不同视场下的波像差去掉前四项后的结果如图 10 所示。为了验证结果的可靠性, 给出了该透镜相同条件下的计算机模拟结果, 并给出了实验结果和模拟结果的差。由

图 10 可知, PMD 测量结果和模拟结果基本一致。表 2 为对应波前的 RMS 值和 PV 值, 可以看出, 在相同视场角下, PMD 测量结果和模拟结果的 RMS 和 PV 值也比较接近。除了用逆向波像差代替正向波像差会引入误差外, 透镜以及相机在调整过程也会引入误差, 但本文所提的 PMD 方法能测量轴外像差, 且测量结果遵从角度越大像差越大的规律。

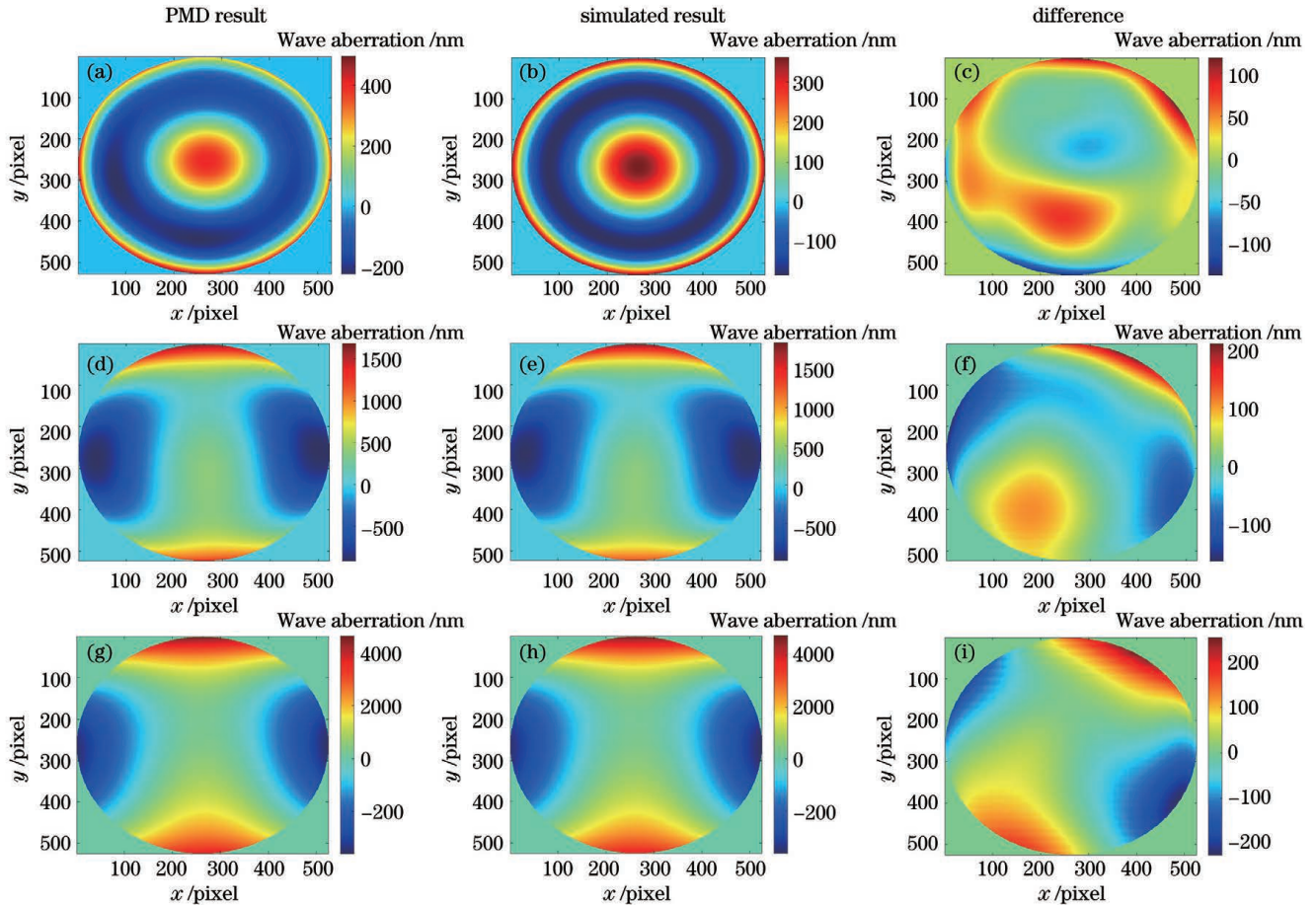


图 10 实验和模拟的波像差去掉 Zernike 多项式前 4 项后的结果。(a)~(c) 0° 半视场; (d)~(f) 3° 半视场; (g)~(i) 5° 半视场
Fig. 10 Experimental and simulated wave aberrations after removing first four terms of Zernike polynomials. (a)~(c) 0° half field angle; (d)~(f) 3° half field angle; (g)~(i) 5° half field angle

表 2 不同视场角下 PMD 测量结果和模拟结果的 RMS 和 PV 值

Table 2 RMS and PV values of PMD and simulated results at different field angles

Result	0°	2.88°	5.17°
PMD result	RMS of 168.6 nm, PV of 721.2 nm	RMS of 500.5 nm, PV of 2605.9 nm	RMS of 1580.3 nm, PV of 8201.8 nm
Simulated result	RMS of 160.9 nm, PV of 540.8 nm	RMS of 530.5 nm, PV of 2811.1 nm	RMS of 1613.9 nm, PV of 8418.7 nm
Difference	RMS of 36.3 nm, PV of 253.7 nm	RMS of 61.1 nm, PV of 373.1 nm	RMS of 82.4 nm, PV of 479.1 nm

图 11 给出了最大视场(5.17° 半视场)下的实验结果和模拟结果, 其中对于波像差的 Zernike 系数的第 6 项(像散)、第 8 项(彗差)以及第 11 项(球差), 实验结果和模拟结果分别相差 65.0、9.4、2.73 nm, 而高阶像差可以忽略, 初级像差是主要成分。由于透镜在加工

制造过程中会引入误差, 利用本文所提方法测量的透镜波像差包含了透镜固有像差及加工制造和测量过程引入的附加像差, 而模拟的结果仅包含透镜固有像差, 这会导致实验结果和理论结果存在差异。测量过程引入的误差有点光源显微镜的景深引入误差、实验中使

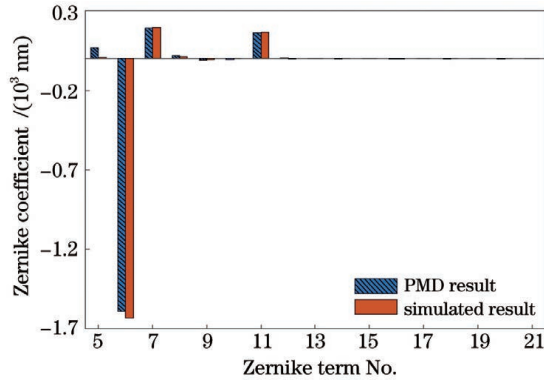


图 11 5.17°半视场角下的实验和模拟结果

Fig. 11 Experimental and simulated results at 5.17° half field angle

用的平移导轨回程误差以及其他可能误差,我们以测量误差为 0.2 mm 来模拟分析 5.17°半视场下的波像差,得到 RMS 误差的统计平方根差(RSS)为 65.253 nm,占

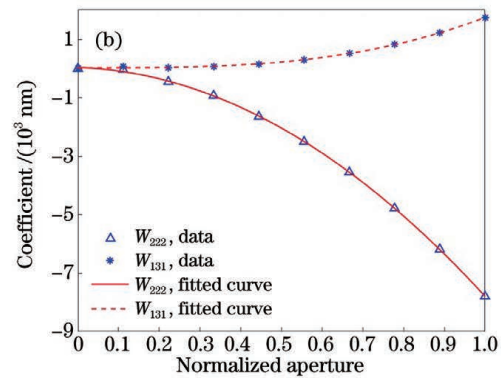
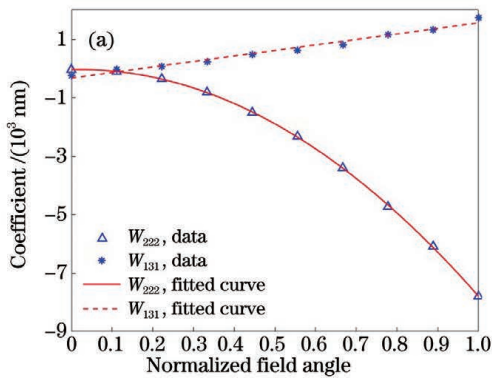


图 12 不同条件下的平凸透镜初级像散和初级彗差系数。(a)不同视场角(孔径为 60 mm);(b)不同孔径(视场角为 5.17°)
Fig. 12 Coefficients of primary coma and astigmatism of plano-convex lens under different conditions. (a) Different field angles with aperture of 60 mm; (b) different apertures with field angle of 5.17°

5 结 论

提出了一种测量透镜轴外点波像差的方法。首先介绍了测量透镜轴外像差的基本原理。然后模拟分析了平凸透镜在不同视场下的正向波像差和逆向波像差。最后通过实验测量了有效孔径为 60 mm 的平凸透镜在 10 个不同视场角下的波像差,并将实验结果和模拟结果进行对比,分析了轴外点初级像散和初级彗差随视场和入瞳孔径的变化规律,验证了该方法的可靠性。所提方法原理简单,实验中仅需一台显示器和一个 CCD 相机就能对成像透镜进行轴外点波像差测量。该方法在一定程度上弥补了干涉仪不能有效测量透镜轴外点波像差的缺点,为成像透镜轴外点波像差的在线测量提供了一种可行方案。

参 考 文 献

[1] Zhang Y Q, Gross H. Systematic design of microscope objectives. Part II: lens modules and design principles [J]. Advanced Optical Technologies, 2019, 8(5): 349-384.
[2] 李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 宽覆盖高分辨率机载相机光学系

总 RMS 值(1580.3 nm)的 4.13%;PV 误差的 RSS 值为 334.492 nm, 占总 PV(8201.8 nm)值的 4.08%。

根据前面第 3 节提到的方法,本文利用式(4)将 Zernike 多项式系数转换为初级像散系数 W_{222} 以及初级彗差系数 W_{131} ,得到的平凸透镜初级像散和初级彗差系数随归一化视场的变化规律如图 12(a)所示;然后在最大视场角(5.17°半视场角)下改变透镜入瞳孔径大小,得到的像散和彗差随归一化入瞳孔径的变化规律如图 12(b)所示。用最小二乘算法拟合数据点,这里仍用一次多项式拟合彗差与视场[图 12(a)虚线]的变化关系,用二次多项式拟合像散与视场[图 12(a)实线]和入瞳孔径[图 12(b)实线]的变化关系,用三次多项式拟合彗差和入瞳孔径[图 12(b)虚线]的变化关系,得到的拟合曲线如图 12 所示。可以看出,该结果和图 6 模拟结果的变化规律一致,实验结果验证了本文所提方法的可靠性。

统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0222001.

Li J H, Tan F L, Zeng C X, et al. Optical system design of wide-coverage and high-resolution airborne camera [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0222001.
[3] 常颖, 崔庆丰, 朴明旭. 迈克耳孙扫描线聚焦光学相干层析系统的光学设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0608002.
Chang Y, Cui Q F, Piao M X. Optical design of michelson interferometer based line-field swept source optical coherence tomography system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0608002.
[4] 张健, 刘伟奇, 王汝冬, 等. 自重变形对超高精度 Fizeau 干涉仪的光学性能影响[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0712001.
Zhang J, Liu W Q, Wang R D, et al. Effect of gravity deformation on optical performance of super-accuracy Fizeau interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0712001.
[5] Malacara-Hernández D, Malacara-Doblado D. What is a Hartmann test? [J]. Applied Optics, 2015, 54(9): 2296-2301.
[6] Neal D R, Copland J, Neal D A. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4779: 148-160.
[7] Takato N, Iye M, Yamaguchi I. Wavefront reconstruction error of Shack-Hartmann wavefront sensors[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1994, 106: 182-188.
[8] Hou C L, Bai J. Wavefront measurement for long focal large aperture lens based on Talbot effect of Ronchi grating [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 48: 1037-1041.
[9] 郭春风, 苏显渝, 陈文静, 等. 一种新的非球面零朗奇检测法

- [J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0812002.
- Guo C F, Su X Y, Chen W J, et al. A new null ronchi test for aspheric surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0812002.
- [10] Canabal H, Quiroga J A, Bernabeu E. Improved phase-shifting method for automatic processing of Moiré deflectograms[J]. Applied Optics, 1998, 37(26): 6227-6233.
- [11] Legarda-Saenz R. Robust wavefront estimation using multiple directional derivatives in Moiré deflectometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(9): 915-921.
- [12] Canabal H A, Alonso J. Automatic wavefront measurement technique using a computer display and a charge-coupled device camera[J]. Optical Engineering, 2002, 41: 822-826.
- [13] Jiang L L, Zhang X D, Fang F Z, et al. Wavefront aberration metrology based on transmitted fringe deflectometry [J]. Applied Optics, 2017, 56(26): 7396-7403.
- [14] Wang D D, Xu P, Gong Z D, et al. Transmitted wavefront testing with large dynamic range based on computer-aided deflectometry[J]. Journal of Optics, 2018, 20(6): 065705.
- [15] Rayces J L. Exact relation between wave aberration and ray aberration[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1964, 11(2): 85-88.
- [16] Southwell W H. Wave-front estimation from wave-front slope measurements[J]. Journal of the Optical Society of America, 1980, 70(8): 998-1006.
- [17] Liu K, Wang J N, Wang H, et al. Wavefront reconstruction for multi-lateral shearing interferometry using difference Zernike polynomials fitting[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 75-81.
- [18] 赖恒, 李大海, 高锦瑞, 等. 基于相位测量偏折术的透镜波像差检测方法[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(3): 25-32.
- Lai H, Li D H, Gao J R, et al. Measurement method of wavefront aberration of transmission optical element based on phase measuring deflectometry [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2021, 19(3): 25-32.
- [19] Goodwin E P, Wyant J C. Field guide to geometrical optics[M]. Bellingham: SPIE Press, 2004: 23-24.

Off-Axis Point Wave Aberration Testing for Imaging Lens Based on Phase Measuring Deflectometry

Ruan Yilang¹, Li Dahai^{1,2*}, Yu Linzhi¹, Zhang Xinwei¹, Xiao Xiangtian¹

¹ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

² School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

Abstract

Objective Imaging lenses, as a type of important optical element, are widely used in microscopes, cameras, and lasers. The demand for imaging lenses has considerably increased because of the rapid development of the optical industry, and there is an important need for a method that can efficiently measure the wave aberration of imaging lenses. The existing methods mainly include interferometry and geometric methods. Interferometry can achieve high accuracy. However, this has limitations in practice because of its low dynamic range, high costs, and inability to be used for online optics testing. Furthermore, this method cannot measure the off-axis aberration of imaging lenses. The accuracy of the Shack-Hartmann test method is limited by the size and quality of the microlens array and the low sampling rate of the data used to reconstruct the wavefront. The Ronchi test method is usually used to measure low-order aberrations and cannot completely evaluate wavefronts. The accuracy of Moiré deflectometry greatly depends on the grating quality. To overcome the existing difficulties, we propose a new method for measuring the off-axis aberration of imaging lenses. This method has the advantages of high dynamic range, simple equipment, low cost, and is not sensitive to the testing environment. Furthermore, complex camera calibration processes are avoided.

Methods During the reversed Hartmann test, rays are emitted from the pinhole of the camera. These rays leave the exit pupil of the lens and intersect the liquid crystal display (LCD) screen. The wave aberration of the lens can be calculated using the aberration theory as long as the coordinates of the idea intersection points, real intersection points, and exit pupil plane are obtained. Therefore, a measurement system is built, and the coordinates of the real intersection points are obtained using a phase shift algorithm. Meanwhile, the model of the experiment system is built in software with calibrated parameters. The coordinates of the idea intersection points and the exit pupil plane can be obtained by ray-tracing. The derivative of wave aberration can be calculated using these three sets of coordinates. Finally, the wave aberration of the lens can be obtained by integration.

Results and Discussions The simulation results show that our method can realize good accuracy. When the field angle is 5°, the errors of the result for a plano-convex lens are only 2.43% in RMS and 3.51% in PV (Fig. 4). The primary astigmatism measured using the proposed method is proportional to the square of the field of view and the square of the entrance pupil's diameter, and the primary coma is proportional to the field of view and the cube of the entrance pupil's diameter (Fig. 6), which is consistent with the theory of primary aberration. These proportional relationships are used to confirm the feasibility of the proposed method. Furthermore, this method is also used in the experiment to measure the aberrations of a plano-convex lens at different field angles. The errors are not high (4.13% in RMS and 4.08% in PV),

even at a field angle of 5.17° . Therefore, this method is feasible in the experiment.

Conclusions This study proposes a novel off-axis aberration measurement method based on phase measuring deflectometry. The reversed ray-tracing method is presented based on the theory of aberration and the reversed Hartmann test viewpoint at first, and then the method for obtaining wave aberration is introduced. The difference between the actual wave aberration and that measured wave aberration using our method is then analyzed at different field angles in the simulation for a plano-convex lens, confirming that the reversed wave aberration can replace the forward wavefront aberration. Finally, in the experiment, a plano-convex lens with a diameter of 60mm is tested at different field angles, and the measurement system is built. The result is compared with that of the simulation to confirm the accuracy of the experiment and analyze the sources of errors. The method proposed in this study is simple. The off-axis aberration of an imaging lens can be measured effectively with an LCD screen and a charge coupled device (CCD) camera, and it provides a feasible method to realize the online off-axis aberration measurement.

Key words measurement; transmission wavefront measurement; phase measuring deflectometry; wave aberration; off-axis points