

自由曲面成像系统的光学性能评价

陈玉强, 张效栋, 刘现磊*

天津大学微纳制造工程技术中心精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 光学自由曲面的波前像差复杂多样且非对称, 当波前像差的峰谷值满足要求时, 对应的光学调制传递函数未必满足要求。因此, 必须获得主要的光学性能参数进行评价, 但目前没有专门的软件可实现光学性能参数之间的相互转化。基于傅里叶光学与相位重构理论, 建立了光学性能基本指标评价体系。通过测量单一光学性能参数实现光学性能的多参数评价, 降低了测量成本, 提高了测量效率, 并通过仿真与实验验证了该体系的正确性。研究结果可为自由曲面成像光学系统的面形误差补偿及光学质量可控制造提供理论指导。

关键词 傅里叶光学; 光学性能; 波前像差; 点扩展函数; 调制传递函数

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2412002

Evaluation of Optical Performance of Free-Form Surface Imaging System

Chen Yuqiang, Zhang Xiaodong, Liu Xianlei*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Centre of Micro Nano Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The wavefront errors (WFE) of optical freeform surfaces are complex, diverse and asymmetric. When the peak valley values of WFE meet the requirements, the corresponding optical modulation transfer function may not meet the requirements. Therefore, it is necessary to obtain the main optical performance parameters for evaluation. However, there is no special software to realize the mutual conversion between optical performance parameters. Based on the theory of Fourier optics and phase retrieval, the basic index evaluation system of optical performance is established in this work. The multi parameter evaluation of optical performance is realized by measuring a single optical performance parameter. The measurement cost is reduced and the measurement efficiency is improved. The correctness of the system is verified by simulation and experiment. The research results can provide theoretical guidance for surface error compensation and optical quality controllable manufacturing of free-form imaging surface imaging optical system.

Key words Fourier optics; optical performance; wavefront error; point spread function; modulation transfer function

OCIS codes 300.6300; 100.5070; 120.5050; 120.3940

1 引 言

随着超精密制造技术的飞速发展, 光学自由曲面得到了广泛应用。已有研究表明, 即使光学元件面型误差的峰谷值(PV)相同, 最终光学系统的性能也会随误差分布的变化而不同^[1]。与光学元件表面质量相关的光学性能研究逐渐增多^[2-5], 光学性能也逐渐成为光学系统制造和应用的最终评价标准。表征光学系统性能的主要参数包括波前像差(WFE)、点扩展函数(PSF)、调制传递函数(MTF)、能量集

中度(EE)、斯特列尔比(SR)等。其中, WFE、PSF与MTF分别从光程差、理想点光源成像畸变与空间频率对比度损失方面描述光学系统的性能。相比非球面, 自由曲面的表面误差/波前像差分布是复杂、多样、非对称的, 仅用一个指标很难进行全面的光学性能评价。因此, 实际应用中, 对光学系统进行评价分析时需要综合考虑多种光学性能参数^[6]。

测量WFE的方法如Twyman-Green激光干涉仪、Shack-Hartmann波前传感器、点衍射激光干涉仪, 不仅成本高, 且多适用于小像差光学系统的测

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-07-26; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0701200)、国家自然科学基金(61635008)、中国博士后科学基金(2018M641645)、天津市自然科学基金(19JCZDJC39100)

* E-mail: liuxianlei1987@tju.edu.cn

量,对于大像差光学系统需借助其他辅助镜面。PSF与MTF一般采用小孔法、狭缝法或刀口法测量,对于大、小像差系统均适用。SR、EE可直接通过PSF获得。同时测量WFE、PSF和MTF需要不同的测量仪器,且会耗费大量的时间和人力成本。目前主流的光学设计软件如ZEMAX,只能在设计过程中实现WFE到PSF和MTF的转换,且该转换不可逆。此外,设计过程中的性能分析结果只能证明光学设计是否合理,不包含对实际制造过程的影响。部分商业软件如MetroPro、4Sight、Vision往往附属于原设备(如激光干涉仪、轮廓仪)上,且只能实现WFE到PSF和MTF的单向转换。目前,没有专门的软件可实现不同光学性能指标之间的相互转换,尤其是PSF到WFE的转化。PSF的测量时间短、设备简单、效率高,且与WFE之间存在一定的关系,因此,可通过测量PSF实现多种光学性能参数的高效测量。

光场函数通常采用复数表示,幅值信息与光场强度有关,相位信息则表示光程差。由于缺乏相位信息,无法实现从PSF到WFE的直接转化,需借助特定的相位重构算法。经典的Gerchberg-Saxton(GS)算法^[7]是迭代求解相位重构问题的基本模式。Gonsalves等^[8-9]提出了可同时重构WFE与目标物体的相位差异性算法。Fienup^[10]证明了GS算法的实质是一种梯度下降算法,并提出了带有负反馈的混合输入输出算法。Gu等^[11]提出了更具一般性的杨-顾算法。Basinger等^[12]提出了改进的GS(M-GS)算法,使GS算法的收敛速度更快、稳定性更好。Rodriguez等^[13]提出了用于含噪声衍射图像的过采样平滑算法。李倩等^[14]借助非冗余孔径掩模

干涉估计初始相位,进一步提高了GS算法的平均复原精度。近年来,人们提出将经典相位重构算法与稀疏理论和机器学习等信号处理算法相结合的理论^[15-17]。目前相位重构理论多用于太空/射电望远镜的拼接调整^[18],很少用于光学元件/系统的WFE测量和评价中。因此,利用相位重构算法实现PSF到WFE的转化,可为光学元件/系统的WFE测量提供新的理论和快速测量方法,也可为制造过程提供多样化的评价及补偿数据。

本文首先根据光学成像理论,分析了主要光学性能指标及其相互转换关系;然后基于傅里叶光学理论和相位重构理论,建立了光学性能基本指标评价体系。仅通过测量一个光学性能指标,就能得到其他多个光学性能指标,从而降低测量成本、提高测量效率,为超精密加工和光学器件的应用提供多样化的评价数据。

2 光学性能基本指标评价体系

WFE为实际波前和理想波前的差,其PV和均方根值(RMS)越小,表明光学系统的性能越好。PSF为理想点光源通过光学系统在焦平面上的光强分布,光斑面积越小、能量越集中,表明光学系统的性能越好。MTF反映了调制随空间频率的变化情况,MTF曲线与坐标轴围成的面积越大,表明光学系统性能越好。基于各性能参数之间关系,建立了光学性能基本指标评价体系,如图1所示。其中,双向箭头表示可逆运算,单向箭头表示不可逆运算。首先,由WFE直接得到广义光瞳函数,基于基尔霍夫衍射积分运算实现广义光瞳函数到振幅扩展函数(ASF)的转化,再对ASF进行模值平方运算得

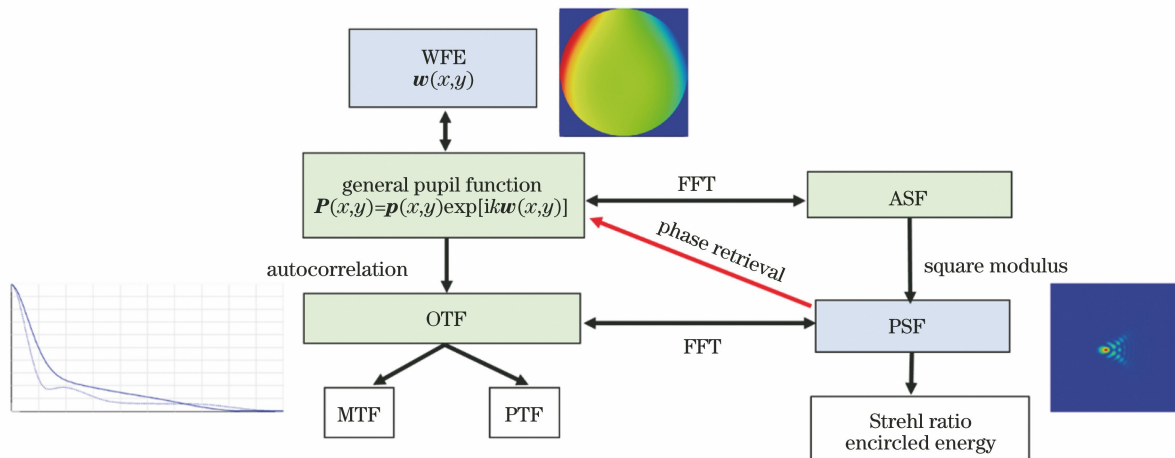


图1 光学性能基本指标的评价体系

Fig. 1 Evaluation system of basic index of optical performance

1) 给定广义光瞳函数的相位初值矩阵 ϕ_{pupil}^0 , 将采集得到的出瞳光强 I_{pupil} 进行开方运算得到广义光瞳函数的幅值 A_{pupil} , 组合两者得到广义光瞳函数 U_{pupil} 。

2) 对广义光瞳函数添加不同的离焦相位 W_{defocus}^m 得到 U_{pupil}^m , 然后进行 FFT, 得到像平面光场函数的估计分布 \hat{U}_{image}^m 。其中, m 为不同的离焦位置, n 为迭代次数。

3) 对实际采集的不同离焦位置的离焦光强 I_{image} 进行开方运算, 并代替 \hat{U}_{image}^m 的幅值; 然后进行 FFT 的逆运算得到 U_{pupil}^m 的估计值 \hat{U}_{pupil}^m , 分别去除离焦相位 W_{defocus}^m 后, 进行加权平均, 得到广义光瞳函数的估计值 \hat{U}_{pupil}^n 。

4) 将 \hat{U}_{pupil}^n 的相位部分作为下次迭代的估计初值, 如有需要, 可进行相位解包裹或 Zernike 多项式拟合运算^[25]。

5) 重复步骤 2)~步骤 4), 直到迭代次数足够大或估计值的幅值部分与实际幅值基本一致。

基于相位重构算法可实现 PSF 到 WFE 的转化, 也为光学元件/系统的 WFE 评价提供了新的测量方法, 测量示意图如图 3 所示。首先, 找到待测光学元

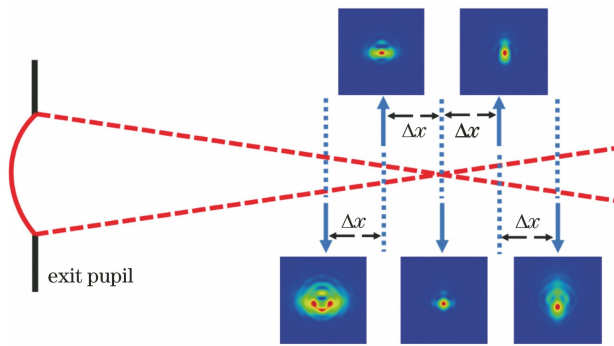


图 3 M-GS 算法的测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of measurement of M-GS algorithm

件/系统的焦点; 其次, 测量焦点处的 PSF 以及不同离焦距离 Δx 处的光斑图像; 最后, 将测量数据带入 M-GS 算法中得到 WFE。对于离焦距离的选择, 首先要保证离焦像差引起的离焦像斑变化足够对抗噪声; 其次, 最大离焦距离受衍射计算过程中光场采样的限制^[26]。离焦引入的球差系数 W_{040} 需满足^[27]

$$W_{040} \leq \frac{3}{16} \frac{N\lambda}{S}, \quad (5)$$

式中, N 为 CCD 的采样点数, S 为光场采样率, 当光强图像满足奈奎斯特采样时, $S=2$ 。

相比干涉仪, 基于相位重构理论的 WFE 测量方法具有光学测量系统结构简单、测量范围大^[26] (直径或波前)、抗抖动^[28] 等优点。相位重构方法基于衍射理论, 通过可调采样间隔进行计算。此外, 还可以获得 WFE 的中频误差信息^[29], 有助于深入研究表面频率误差与加工参数、光学性能之间的关系。对于复杂光学系统, 一般采取相位重构与孔径拼接^[30-31] 或坐标系转化^[32] 方法进行测量, 若对视场、波长存在特殊要求, 还需借助其他光学系统或元件^[28, 33]。

3 仿真分析

实验采用 ZEMAX 软件建立平凸透镜单镜光学系统, 对建立的光学性能基本指标评价体系进行仿真分析。对应的光路如图 4 所示, 出瞳采样数为 1024×1024 。仿真参数如表 1 所示, Z 为 Zernike 多项式系数, BK7 为常见光学玻璃材料。

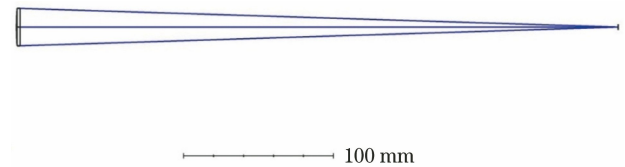


图 4 平凸透镜的光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the optical path of plano-convex lens

表 1 平凸透镜的仿真参数

Table 1 Simulation parameter of the plano-convex lens

Type	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Semi-diameter /mm	Z_4/λ	Z_5/λ	Z_8/λ
Standard	206.100	2.380	BK7	12.500	/	/	/
Zernike fringe phase(stop)	∞	399.040	/	12.500	0.3	0.2	0.1

用 ZEMAX 软件仿真得到该平凸透镜的原始 WFE、PSF 和 MTF 曲线如图 5 所示。将 WFE 引入光学性能基本指标评价体系中, 对应的 PSF 和 MTF 如图 6 所示。圆形标记的曲线为 ZEMAX 仿

真的原始数据, 方形标记的曲线为评价体系的计算结果。可以发现, 两种方法得到的曲线基本吻合, 这表明本评价体系中 WFE 到 PSF、MTF 的转化过程是正确的。

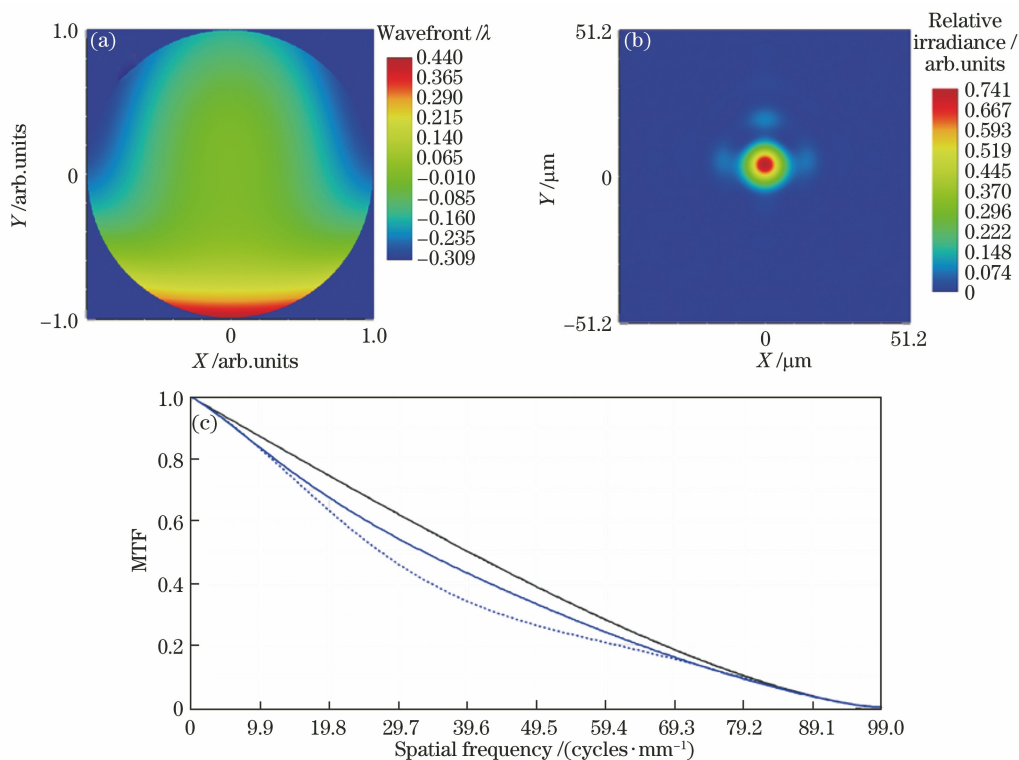


图 5 ZEMAX 的仿真结果。(a) WFE;(b) PSF;(c) MTF

Fig. 5 Simulation results of ZEMAX. (a) WFE; (b) PSF; (c) MTF

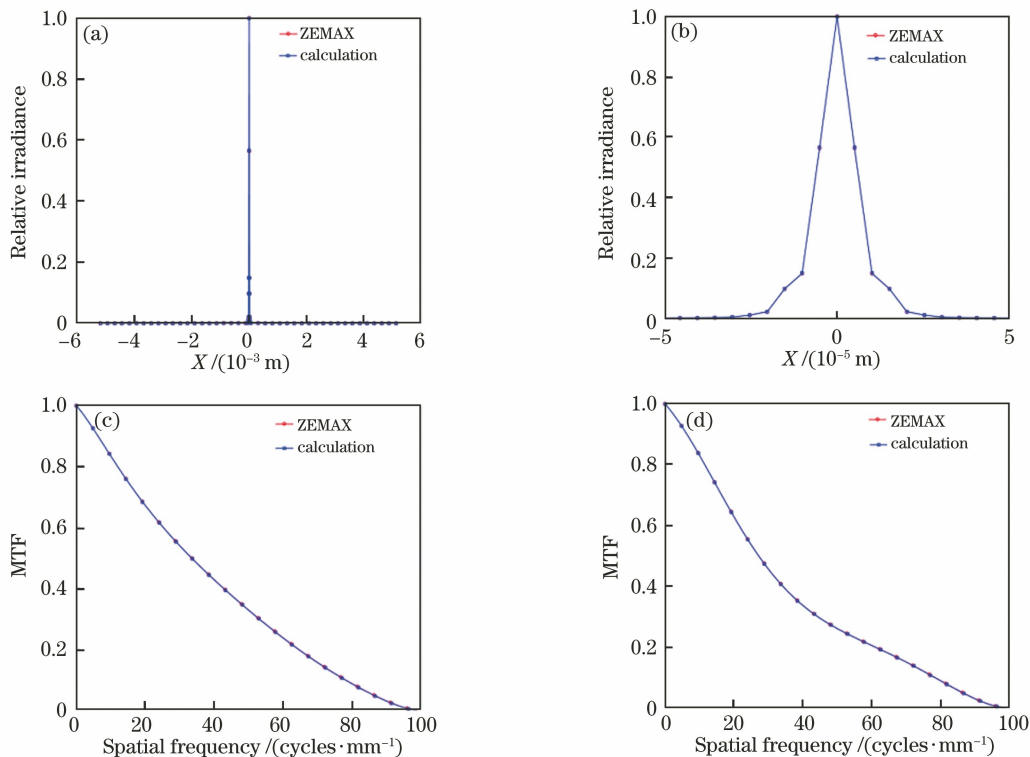


图 6 计算结果对比。(a) PSF;(b) PSF 中心的放大图;(c)子午 MTF;(d)弧矢 MTF

Fig. 6 Comparison of computational results. (a) PSF; (b) enlarged view of PSF center; (c) tangential MTF; (d) sagittal MTF

离焦距离分别为 $-1000, -500, 0, 500, 1000 \mu\text{m}$ 的离焦光斑图像如图 7 所示。将图 7 导入评价体系中,ZEMAX 仿真的原始数据如图 8(a)所

示,用 M-GS 算法计算得到的 WFE 如图 8(b)所示。可以发现,两者的 WFE 形状基本一致,最大 PV 和 RMS 如表 2 所示,偏差仅为 0.3%,这也验证了本

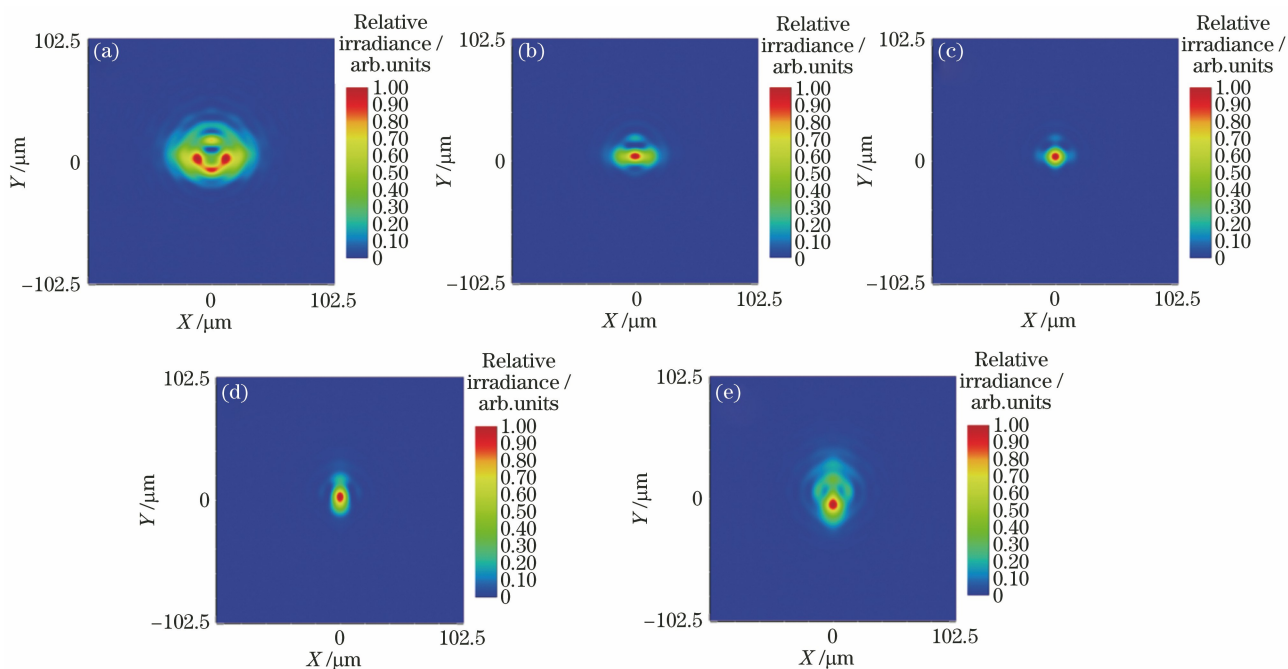


图 7 不同离焦距离下的像斑。(a) 1000 μm ; (b) $-500 \mu\text{m}$; (c) $0 \mu\text{m}$; (d) $500 \mu\text{m}$; (e) $1000 \mu\text{m}$

Fig. 7 Image spots obtained at different defocus distances. (a) $1000 \mu\text{m}$; (b) $-500 \mu\text{m}$; (c) $0 \mu\text{m}$; (d) $500 \mu\text{m}$; (e) $1000 \mu\text{m}$

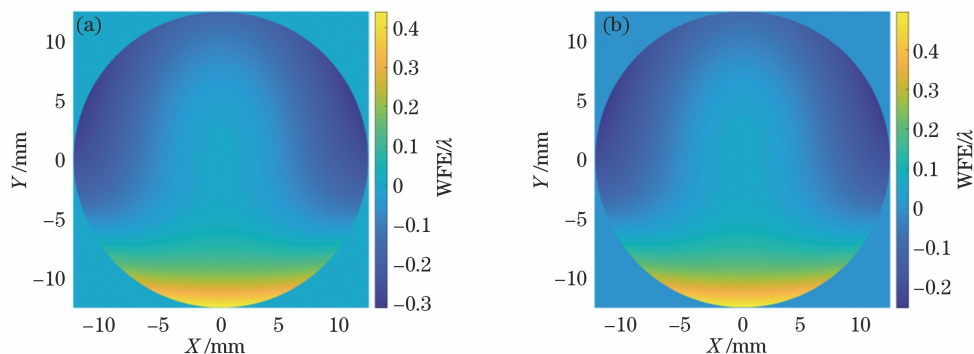


图 8 不同方法得到的 WFE。(a) ZEMAX; (b) M-GS 算法

Fig. 8 WFE obtained by different methods. (a) ZEMAX; (b) M-GS algorithm

表 2 不同方法得到的 WFE 参数

Table 2 WFE parameters obtained by different methods

WFE	PV/ λ	RMS/ λ
ZEMAX	0.7493	0.1341
Calculated by our model	0.7471	0.1337

评价体系的正确性。

4 实验分析

借助激光干涉仪,进行了平凸透镜的实测实验。实验装置如图 9 所示,待测透镜和实验装置的主要参数如表 3 所示。其中,FPS 为每秒传输帧数,通光孔径设置为 15.000 mm ,以满足 F 数限制^[26]。

实际离焦距离为 $-1000, -600, -200, 200,$



图 9 实验装置

Fig. 9 Experiment configuration

$600, 1000 \mu\text{m}$ 时的离焦图像如图 10 所示,实际图像的尺寸为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,实验只展示尺寸为 $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ 的中心区域。后续计算过

程中,将原始图像补零至尺寸为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 进行计算。干涉仪测量的 WFE 如图 11(a)所示。将图 10 中的离焦图像输入光学性能基本指标评价体系中,计算得到的 WFE 如图 11(b)所示

表 3 实验设备的主要参数

Table 3 Main parameters of experiment devices

Experiment device	Main parameter
TRIOPTICS μ Phase 1000 Twyman-Green interferometer	lens type: plano50, Dia: $\Phi 50 \text{ mm}$, camera inside: $1024 \text{ pixel} \times 1020 \text{ pixel}$, 8 bits, wavelength: 632.8 nm , uncertainty: $\lambda/20$, method: five step phase-shifting method
KOHZU XA10A-R2 Stepper motor	resolution: $1 \mu\text{m}$, range: 2.5 mm straightness: $< 1 \mu\text{m}/25 \text{ mm}$
Hikvision MV-CA030-10GM CCD Camera	pixel size: $3.69 \mu\text{m} \times 3.69 \mu\text{m}$, $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ interface: GigE, FPS: 25 frame
Plano-convex lens under test	diameter: 34.000 mm , focal: 200 mm , material: N-BK7 radius: 103.010 mm , thickness: 2.780 mm
HengYang GCM-1123M three-degree of freedom rotational platform	range: $\pm 4^\circ$, resolution: $2'$

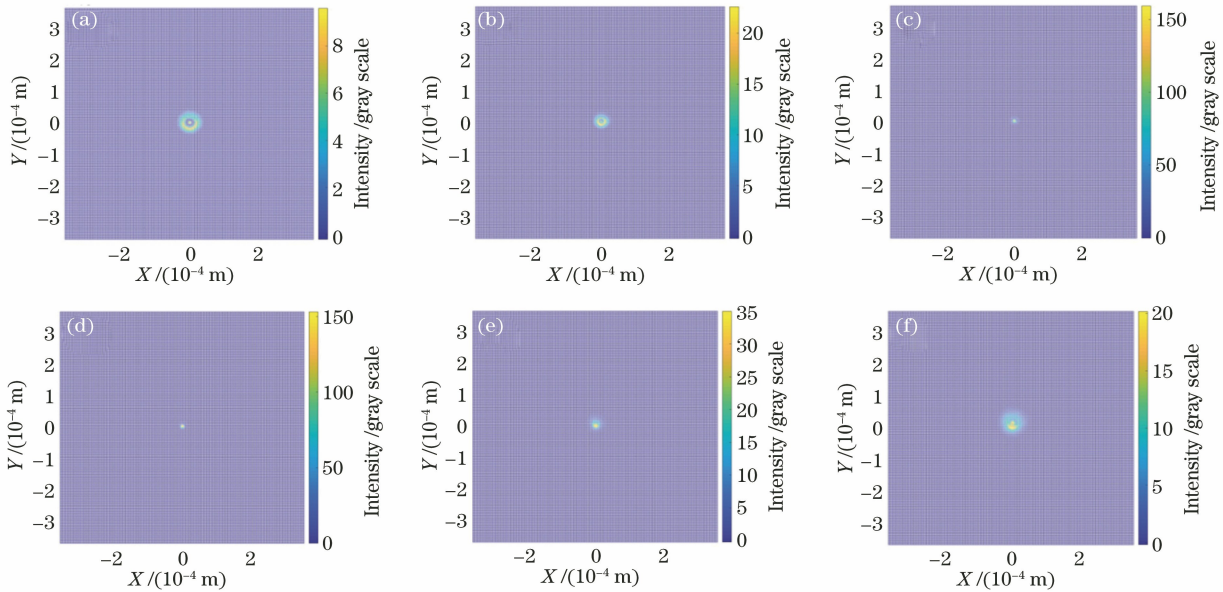


图 10 不同离焦距离下的实际像斑。(a) $-1000 \mu\text{m}$; (b) $-600 \mu\text{m}$; (c) $-200 \mu\text{m}$; (d) $200.0 \mu\text{m}$; (e) $600 \mu\text{m}$; (f) $1000 \mu\text{m}$

Fig. 10 Actual image spots at different defocus distances. (a) $-1000 \mu\text{m}$; (b) $-600 \mu\text{m}$; (c) $-200 \mu\text{m}$; (d) $200.0 \mu\text{m}$; (e) $600 \mu\text{m}$; (f) $1000 \mu\text{m}$

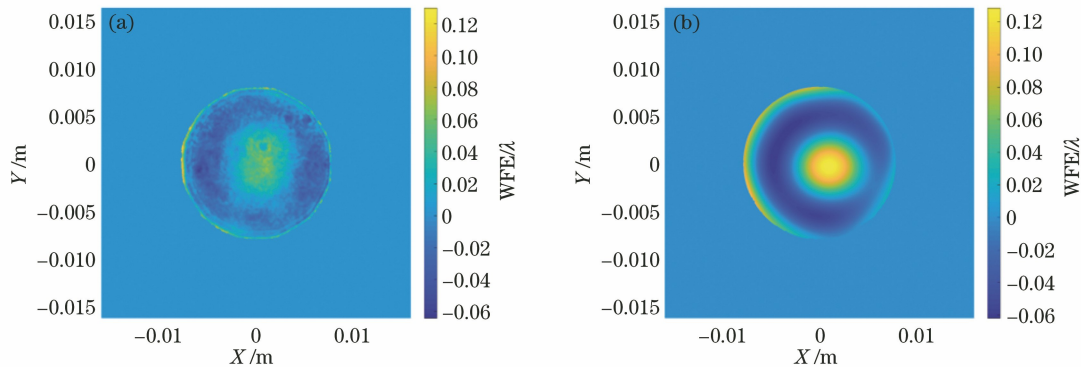


图 11 不同方法得到的 WFE。(a)干涉仪;(b) M-GS 算法

Fig. 11 WFE obtained by different methods. (a) Interferometer; (b) M-GS algorithm

示。可以发现,测量 WFE 与计算 WFE 的形状基本一致。不同方法得到的 WFE 参数如表 4 所示,可以发现,两者的 PV 和 RMS 偏差仅为 1.7% 左右。

表 4 不同方法得到的 WFE 参数(实际光斑)
Table 4 WFE parameters obtained by different methods (actual spot)

WFE	PV/ λ	RMS/ λ
Interferometer	0.1944	0.0240
Calculated by our model	0.1910	0.0458

将干涉仪实测的 WFE 和相位重构的 WFE 代入性能评价体系中,分别计算与其对应的 PSF 和 MTF,并与相机实际采集的 PSF 进行对比,结果如图 12 所示,其中, X 方向为弧矢方向, Y 方向为子午方向,三角标识的曲线为 CCD 直接获取的 PSF 曲线,圆形标识的曲线为干涉仪实测 WFE 计算得到的 PSF 曲线,方形标识的曲线为相位重构 WFE 计算得到的 PSF 曲线。对比发现,三条 PSF 曲线的变化基本一致。图 13 为干涉 WFE、重构 WFE 和实测 PSF 计算得到的 MTF 结果,可以发现,三条 MTF 曲线基本一致。

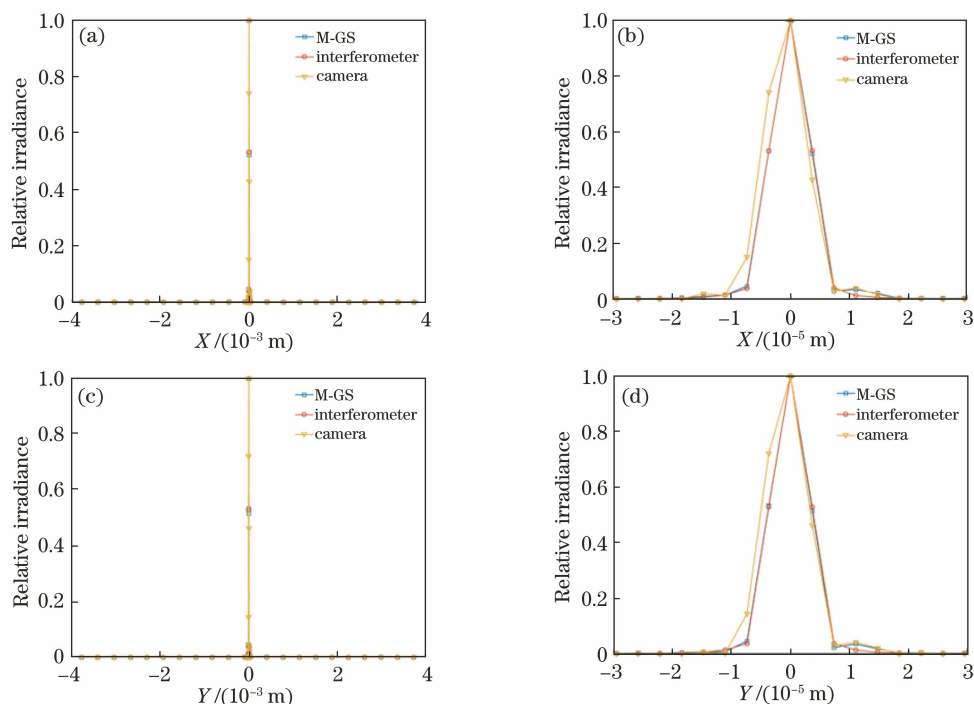


图 12 不同方法测量的 PSF。(a) X 方向的中心轮廓;(b) X 方向的中心放大图;(c) Y 方向的中心轮廓;(d) Y 方向的中心放大图

Fig. 12 PSF measured by different methods. (a) Center profile in X direction; (b) center magnified view in X direction; (c) center profile in Y direction; (d) center magnified view in Y direction

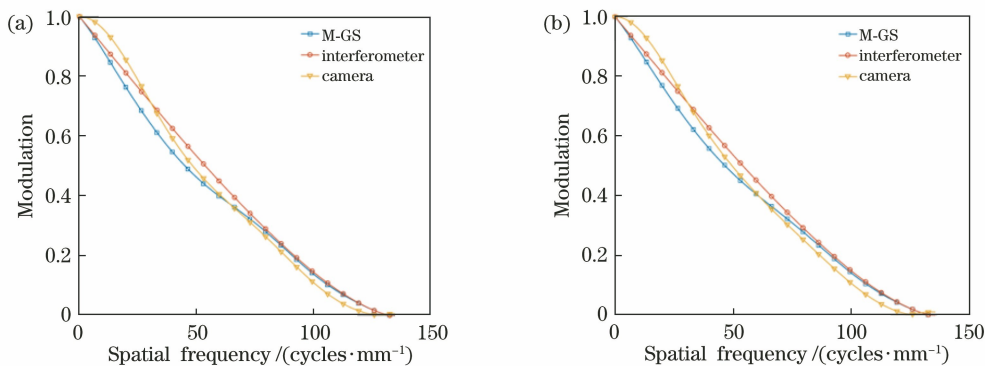


图 13 不同方法得到的 MTF。(a) X 方向;(b) Y 方向

Fig. 13 MTF obtained by different methods. (a) X direction; (b) Y direction

5 结 论

分析了不同光学性能指标之间的关系,基于傅里叶光学与相位重构理论建立了光学性能基本指标评价体系,实现了不同光学性能指标之间的相互转化,并通过仿真和实验验证了该体系的正确性和有效性。该体系可实现仅通过一个指标的测量完成不同性能指标的评价,为光学元件/系统提供了多样化评价方法。基于相位重构理论实现 PSF 到 WFE 的转化,为 WFE 的测量提供了新的理论和快速简便测量方法,避免了昂贵的测量设备和复杂的操作。

参 考 文 献

- [1] Liu X L, Zhang X D, Fang F Z, et al. Influence of machining errors on form errors of microlens arrays in ultra-precision turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 96: 80-93.
- [2] Tamkin J M, Milster T D. Effects of structured mid-spatial frequency surface errors on image performance [J]. Applied Optics, 2010, 49(33): 6522-6536.
- [3] Yabe A. Desensitization to mid-spatial-frequency surface errors [J]. Optics Express, 2019, 27(21): 29985-29991.
- [4] Aryan H, Boreman G D, Suleski T J. Simple methods for estimating the performance and specification of optical components with anisotropic mid-spatial frequency surface errors [J]. Optics Express, 2019, 27(22): 32709-32721.
- [5] Zeng X F, Zhang X J. Impact of mid-spatial frequency errors in optical manufacturing on modulation transfer function[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072202.
曾雪峰, 张学军. 光学制造中频残差对光学调制传递函数的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072202.
- [6] Meiling H, Benschop J P H, Dinger U, et al. Progress of the EUVL alpha tool[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4343: 38-50.
- [7] Gerchberg R W, Saxton W O. Practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik (Stuttgart), 1972, 35(2): 237-250.
- [8] Gonsalves R A, Chidlaw R. Wavefront sensing by phase retrieval [J]. Proceedings of SPIE, 1979, 0207: 32-39.
- [9] Gonsalves R A. Phase retrieval and diversity in adaptive optics [J]. Optical Engineering, 1982, 21(5): 215829.
- [10] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [11] Gu B Y, Yang G Z, Dong B Z. General theory for performing an optical transform[J]. Applied Optics, 1986, 25(18): 3197-3206.
- [12] Basinger S A, Redding D C, Lowman A E, et al. Performance of wavefront sensing and control algorithms on a segmented telescope testbed [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4013: 749-756.
- [13] Rodriguez J A, Xu R, Chen C C, et al. Oversampling smoothness: an effective algorithm for phase retrieval of noisy diffraction intensities [J]. Journal of Applied Crystallography, 2013, 46(2): 312-318.
- [14] Li Q, Wu Z, Xu J S, et al. Phase recovery algorithm based on pupil diversity [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0626001.
李倩, 吴桢, 徐节速, 等. 基于瞳面差异的相位复原算法 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0626001.
- [15] Szameit A, Shechtman Y, Osherovich E, et al. Sparsity-based single-shot subwavelength coherent diffractive imaging [J]. Nature Materials, 2012, 11(5): 455-459.
- [16] Paine S W, Fienup J R. Machine learning for improved image-based wavefront sensing [J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1235-1238.
- [17] Lian Q S, Li Y, Chen S Z. Phase retrieval algorithm fusing multiple wavelets and total variation regularization[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0220001.
练秋生, 李颖, 陈书贞. 融合多种小波与全变差正则化的相位恢复算法 [J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0220001.
- [18] Dong J, Xu Z Q, Sun Y X, et al. Fast measurement of primary reflector dynamic deformation of radio telescope based on multibeam and phase retrieval[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0612005.
董健, 许志强, 孙云霞, 等. 基于多波束相位恢复的射电望远镜主反射面动态形变的快速测量 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0612005.
- [19] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. Qin K C, Liu P S, Chen J B, et al., . Transl. 3rd ed. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2016: 91-118.
Goodman J W. 傅里叶光学导论 [M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2016: 91-118.
- [20] Born M, Wolf E, Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [M]. Yang J S, . Transl. 7th ed. Beijing: Publishing house of electronics industry, 1999: 412-547.

- Born M, Wolf E. 光学原理: 光的传播、干涉和衍射的电磁理论[M]. 杨葭荪, 译. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 1999: 412-547.
- [21] Matsushima K, Shimobaba T. Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19662-19673.
- [22] Katkovnik V, Migukin A, Astola J. Backward discrete wave field propagation modeling as an inverse problem: toward perfect reconstruction of wave field distributions [J]. *Applied Optics*, 2009, 48 (18): 3407-3423.
- [23] Voelz D G. Computational Fourier optics a Matlab tutorial[M]. Washington: SPIE Press, 2011, TT89: 47-86.
- [24] Wyant J C, Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology [J]. *Applied Optics and Optical Engineering*, 1992, 11, 28-39.
- [25] Ghiglia D C, Pritt Mark D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998: 178-279.
- [26] Brady G R, Fienup J R. Measurement range of phase retrieval in optical surface and wavefront metrology [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(3): 442-449.
- [27] Brady G R, Fienup J R. Range of phase retrieval in optical metrology [C]//Frontiers in optics, October 16-21, 2005, Tucson, Arizona, US. Washington: OSA, 2005: FTuS3.
- [28] Lowman A E, Redding D C, Basinger S A, et al. Phase retrieval camera for testing NGST optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4850: 329-335.
- [29] Zhao L, Huang X, Bai J, et al. Comparative analysis of mid-spatial frequency errors measurement using multiple phase retrieval algorithms [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 1081: 108151M.
- [30] Michalko A M, Fienup J R. Development of a convex surface measurement using prescription retrieval [C]//Freeform Optics 2019, June 10-12, 2019, Washington DC, US. Washington: OSA, 2019: JW2A.7.
- [31] Michalko A M, Fienup J R. Transverse translation diverse phase retrieval for reflective and freeform surface metrology [C]//Frontiers in Optics 2016, Rochester, New York. Washington, D. C.: OSA, 2016: FW5H.4.
- [32] Ding L Y. Application of phase retrieval to the measurement of aspheric surfaces [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 96-140.
丁凌艳. 非球面相位恢复检测技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 96-140.
- [33] Cheng Q. The research on phase retrieval in spaceborne camera based on phase diversity [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 119-133.
程强. 基于 PD 方法的空间相机位相信息反演技术研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2013: 119-133.