

成像系统倍率高精度测量技术研究

董冠极^{1,2}, 唐锋^{1,3}, 王向朝^{1,2}, 冯鹏¹, 郭福东¹, 彭常哲^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³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 针对目前尚无高精度通用倍率测量方法与装置的问题, 提出了基于双光纤点衍射干涉仪的成像系统倍率高精度测量方法。通过分析双点光源间距、CCD 相机空间位置与点衍射干涉场相位 Zernike 多项式系数之间的定量关系, 得到物面光纤间距和像面光纤像点间距的纳米级精度测量值, 进而完成对倍率的高精度测量。分别进行仿真分析和实验验证, 证明了所提测量方法的可行性和稳定性。结果表明, 倍率测量的扩展不确定度为 2.64×10^{-6} 。所提出的成像系统倍率高精度测量方法具有测量精度高和测量效率高的特点, 且具备高可靠性, 可以用于显微物镜、光刻投影物镜等高精度成像系统倍率的超高精度测量。

关键词 测量; 倍率; Zernike 多项式; 点衍射干涉法

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0712007

Study on High Precision Magnification Measurement of Imaging Systems

Dong Guanji^{1,2}, Tang Feng^{1,3}, Wang Xiangzhao^{1,2},
Feng Peng¹, Guo Fudong¹, Peng Changzhe^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

³State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In the view of the problem that there is no high precision universal magnification measurement methods and apparatus at present, a high precision magnification measuring method for imaging system based on double fiber point-diffraction interferometer is proposed. The separation distance between two fibers in object plane and the separation distance between the fibers' imaging points in image plane are measured with nanometer accuracy by analyzing the quantitative relationship among the separation distance between double point source, spatial location of CCD camera and the Zernike polynomial coefficients of the phase distribution of the point-diffraction interference field. And then, high precision magnification measurement is achieved. Simulation and experimental verification have been carried out to demonstrate the feasibility and stability of the proposed measuring method. The results show that the expanded uncertainty of the magnification measurement is 2.64×10^{-6} . The proposed method has the merits of high accuracy, high efficiency and high reliability. It can be used to measure the magnification of high accuracy imaging system with ultra-high precision, such as microscope objectives and lithographic projection lens.

Key words measurement; magnification; Zernike polynomial; point-diffraction interferometry

OCIS codes 120.4630; 110.3000; 350.5030; 120.4640

收稿日期: 2018-01-10; 收到修改稿日期: 2018-03-05

基金项目: 中国科学院青年创新促进会、应用光学国家重点实验室开放基金

作者简介: 董冠极(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事成像系统成像质量检测方面的研究。

E-mail: dongguanji@siom.ac.cn

导师简介: 唐锋(1979—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: tangfeng@siom.ac.cn

1 引 言

高精度成像系统在生物检测、生物医药、微电子、精密制造等领域有着广泛应用。倍率是光学系统物、像面定位的重要依据,高精度倍率测量是进行高精度光学成像系统波像差、畸变等像质参数测量的前提。对于倍率的测量^[1-2],传统方法主要为精密测长法、精密测角法和星点法等。精密测长法是对标定过的标准网格板进行拍摄,然后利用显微镜或比长仪测量目标图像,通过与计算得到的理想像比较求得倍率值;精密测角法是通过在望远镜上观察被测系统所成的像,然后利用测角仪测量视场角,并结合网格板上的物点坐标,通过与计算得到的理想像进行比较得到倍率值;星点法首先在成像系统像面的不同视场直接测量星点像的弥散圆中心坐标,再通过计算不同视场的像高来计算成像系统的倍率。

随着工艺水平的发展,一些高精度光学系统应用领域对于倍率的测量精度要求越来越高。以高端光刻机为例,由于套刻对准精度的要求,其投影物镜倍率误差需要控制在 10×10^{-6} 以内^[3-4]。目前,光刻投影物镜的倍率测量技术可以分为两类:基于硅片曝光的技术和基于空间像测量的技术^[5]。基于曝光的测量技术通过光刻机对准系统或专用高精度图形对准与坐标测量系统测量对准标记实际成像位置,根据实际成像位置与理想成像位置的差别,计算得到倍率参数。现有测量系统的测量对准精度可达到 1.2 nm ^[6-8]。基于空间像传感器的原位检测技术直接对掩模上标记经投影物镜所成的空间像进行测量,现有测量系统对于倍率的测量重复性可达到 0.07×10^{-6} ^[5]。这两种技术的使用都依赖于光刻机及其分系统,无法应用于光学系统加工装调车间,以及其他科研和工业应用领域。

本文提出基于双光纤点衍射干涉仪的成像系统倍率高精度测量方法,通过求解双光纤点衍射干涉仪干涉场相位的 $Z_2(x\text{-tilt}) \sim Z_9(\text{spherical error})$ 项 Zernike 多项式系数与光纤间距 d 之间的定量关系,分别标定干涉仪物方光纤间距和像方光纤成像点间距,进而获得成像系统的倍率。分别进行仿真分析和实验验证,以证明所提出方法的可行性。

2 基本原理

2.1 成像系统倍率测量原理

系统的工作原理如图 1 所示。将两根单模光纤

的输出端面置于被测光学系统的物面,光纤输出端经被测光学系统成像在像面形成两个像点,如果能够精确获得物面光纤间距和像面光纤像点间距,即可计算得到被测成像系统的倍率 β :

$$\beta = y'/y, \quad (1)$$

式中: y 和 y' 分别为物面光纤间距和像面光纤像点间距。

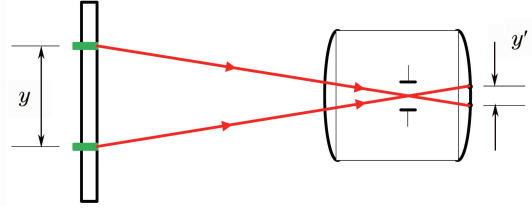


图 1 倍率测量原理图

Fig. 1 Schematic of magnification measurement

根据误差传递原理,倍率的合成测量不确定度为

$$u_{c\beta} = \sqrt{\frac{S_{y'}^2 + (y'/y)^2 S_y^2}{y^2}} = \sqrt{\frac{S_{y'}^2 + \beta_0^2 S_y^2}{y_0^2}}, \quad (2)$$

式中, S_y 、 $S_{y'}$ 分别为物面光纤间距和像面光纤像点间距的测量不确定度, β_0 为成像系统的名义倍率, y_0 为光纤间距名义值。

研究中使用的 $\beta_0 = 1/5$, $y_0 = 254 \mu\text{m}$ 。当认为物面光纤间距与像面光纤像点间距具有相同的测量不确定度时,对于物面光纤间距和像面光纤像点间距测量不确定度的要求为

$$S_y = S_{y'} = \frac{S_{\beta} y_0}{\sqrt{1 - \beta_0^2}}. \quad (3)$$

根据(3)式,可以由倍率误差要求推算出光纤间距的测量误差要求,如表 1 所示。

表 1 光纤间距测量误差要求

Table 1 Error requirement of fiber spacing measurement

Magnification measurement error / 10^{-6}	Fiber separation distance measurement error / nm
1	0.0620
5	1.5509
10	6.2035

2.2 物面光纤间距测量

物面光纤间距测量原理框图如图 2 所示,激光器输出光耦合入保偏光纤(PMF),经过保偏光纤分束器(PMFS)分为两路,两路光分别通过可调衰减器(VOA)调整其光强,通过相移器调整其中一路光与另一路光之间的相位差,以实现相移干涉。两路光纤的输出端面集成于一个平面内,两根光纤的输出光场相互干涉,干涉光场由 CCD 相机接收。

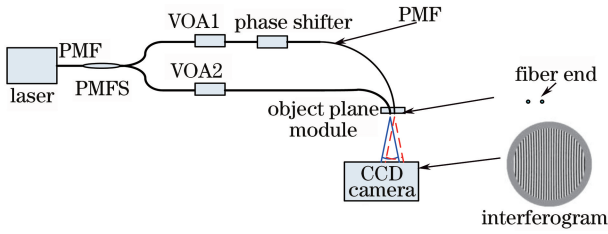


图 2 物面光纤间距测量系统原理图
Fig. 2 Schematic diagram of object plane fibers spacing measurement system

2.2.1 物面光纤间距测量模型

建立测量系统的数学模型,如图 3 所示,将光纤出射端面视作点光源 S_1 和点光源 S_2 ,以两者连线方向作为 X 轴方向,过连线中点且垂直于光源连线方向作为 Y 轴方向,沿光线传播方向作为 Z 轴方向,建立系统坐标系 $O-XYZ$,其中, Z 轴通过面阵探测器坐标系的原点 o 。此时, S_1 和 S_2 的三维坐标分别为 $(d/2,0,0)$ 和 $(-d/2,0,0)$,面阵探测器上某一个像素点在所建坐标系的坐标为 $P(X, Y, Z)$,CCD 探测器坐标系中某一个像素点的坐标为 (x, y) 。

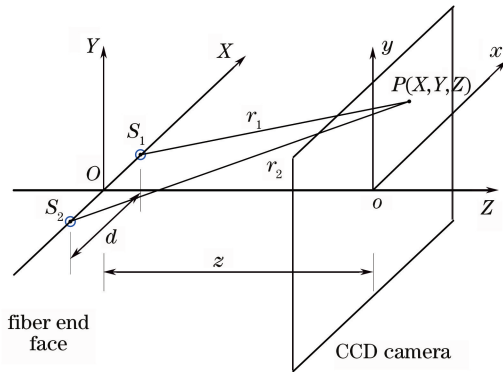


图 3 光纤间距测量的数学模型
Fig. 3 Mathematical model of fiber spacing measurement

由于 CCD 探测器坐标系 $o-xy$ 平面相对于系统坐标系 $O-XY$ 平面存在旋转角度 θ ,及沿 X 轴和 Y 轴方向的倾斜角 γ_x 和 γ_y ,需要使用(5)式进行两个坐标系的坐标变换^[9],即:

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} X = x' \cos \gamma_x \\ Y = y' \cos \gamma_y \\ Z = z + x' \sin \gamma_x + y' \sin \gamma_y \end{cases}, \quad (5)$$

式中, (X, Y, Z) 为系统坐标系的坐标, (x, y) 为 CCD 探测器坐标系的坐标, (x', y') 为校正 CCD 探测器的旋转量后的坐标, z 为光纤出射端面与 CCD 探测器平面的垂直距离。

CCD 探测器每个像素位置的光程差 Δ_{OPD} 可表示为:

$$\Delta_{OPD} = \sqrt{(X + d/2)^2 + Y^2 + Z^2} - \sqrt{(X - d/2)^2 + Y^2 + Z^2}. \quad (6)$$

以圆心位于面阵探测器坐标系原点 o , 光纤输出光有效数值孔径内的圆作为分析计算的有效区域,对于该区域内的相位分布进行 Zernike 多项式分析。

2.2.2 物面光纤间距测量模型仿真

设定按表 2 所示的仿真条件,对物面光纤间距测量模型进行数值仿真计算。

表 2 仿真条件设置

Table 2 Settings of simulation conditions

Simulation parameter	Ideal condition	Non-ideal condition
Light source wavelength λ /nm	532	532
Interference region produced by fiber /(pixel \times pixel)	400 \times 400	400 \times 400
Pixel size / μm	9.9 \times 9.9	9.9 \times 9.9
d / μm	254	254
z /mm	32.941	32.941
θ /($^\circ$)	0	3
γ_x /($^\circ$)	0	2
γ_y /($^\circ$)	0	1

计算得到理想和非理想情况下的波前及其 Zernike 多项式系数值,计算结果如图 4 所示。理想情况下,Zernike 多项式主要包含 Z_2 (x -tilt) 和 Z_7 (3rd-order x -coma) 项像差项,即理想波前主要存在 x 方向倾斜和彗差两种像差。

在非理想情况下,引入 CCD 相机空间位置(垂直距离 z 、CCD 旋转角 θ 、CCD 倾斜角 γ_x 、 γ_y) 误差,仿真波前主要存在 x 方向和 y 方向倾斜、离焦、像散和彗差等 4 种像差。当 CCD 相机存在旋转角 θ 时,Zernike 多项式包含的像差项增加了 Z_3 (y -tilt) 和 Z_8 (3rd-order y -coma) 项;当 CCD 相机存在与 X 轴倾斜角 γ_x 时,Zernike 多项式包含的像差项增加了 Z_4 (defocus)、 Z_5 (3rd-order astigmatism horizontal/vertical) 和 Z_9 (3rd-order spherical) 项;当 CCD 相机存在与 Y 轴倾斜角 γ_y 时,Zernike 多项式包含的像差项增加了 Z_6 (3rd-order astigmatism $\pm 45^\circ$) 项。

在理想情况和非理想情况下,通过改变点光源间距和 CCD 相机空间位置参数,分别仿真分析点光源间距和 CCD 位置参数与 Zernike 多项式系数之间的定量关系,仿真结果如图 5 所示。

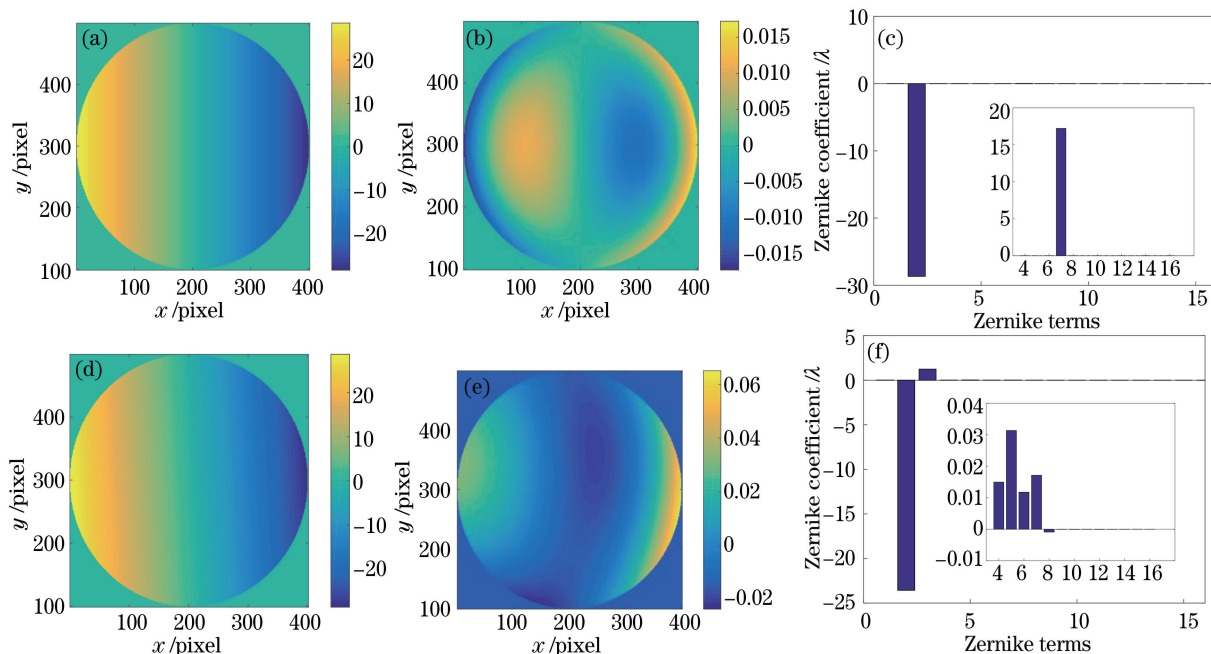


图 4 理想和 非理想情况下仿真得到的波前及其 Zernike 系数值。(a)理想波前；(b)理想波前(无倾斜项)；(c)理想波前的 Zernike 系数；(d)非理想波前；(e)非理想波前(无倾斜项)；(f)非理想波前的 Zernike 系数

Fig. 4 Wavefront and its Zernike coefficient obtained from ideal and non-ideal conditions.

(a) Ideal wavefront; (b) ideal wavefront (without tilt); (c) Zernike coefficient of ideal wavefront; (d) non-ideal wavefront; (e) non-ideal wavefront (without tilt); (f) Zernike coefficient of non-ideal wavefront

仿真结果显示,点光源间距及 CCD 相机空间位置参数中的单一参数与 Zernike 多项式系数之间的定量关系会因其余参数的改变而发生变化。例如,对于光纤间距 d ,在理想和 非理想情况下,Zernike 多项式中 $Z_2(x\text{-tilt})$ 项系数与点光源间距 d 之间的变化虽然都呈线性关系,但是在数值上会存在差异。因此,对于点光源间距及 CCD 相机空间位置参数的求解,需要通过单一参数标定并迭代计算的方式进行。

对于单一参数测量,可以通过选择合适的 Zernike 多项式系数,利用两者之间存在的定量关系进行测量。在理想和 非理想情况下,点光源间距及 CCD 相机空间位置参数与 Zernike 多项式系数之间的定量关系如下:

当点光源间距 d 变化时,Zernike 多项式中 $Z_2(x\text{-tilt})$ 项系数与点光源间距 d 之间,始终呈线性关系,如图 5(a)所示。同样,当垂直距离 z 发生变化时,Zernike 多项式中 $Z_7(3\text{rd-order } x\text{-coma})$ 项系数与垂直距离 z 之间也始终呈线性关系,如图 5(b)所示。对于 CCD 旋转角 θ ,其在 $[-\pi, \pi]$ 之间变化时,Zernike 多项式中 $Z_2(x\text{-tilt})$ 项和 $Z_3(3\text{rd-order } x\text{-coma})$ 项系数与 θ 之间分别呈余弦和正弦

函数关系。此外,当 θ 在 0° 附近较小范围内变化时, $Z_3(3\text{rd-order } x\text{-coma})$ 项系数与 θ 可认为呈线性关系,如图 5(c)、(d)所示。

对于 CCD 与坐标轴之间存在的倾斜角 γ ,当 CCD 与 X 轴倾斜角 γ_x 发生变化时,Zernike 多项式中 $Z_4(\text{defocus})$ 项系数与 γ_x 之间呈线性关系;相同条件下,当 CCD 与 Y 轴倾斜角 γ_y 发生变化时, $Z_4(\text{defocus})$ 项系数基本保持不变。而当 γ_y 发生变化时,Zernike 多项式中 $Z_6(\text{defocus})$ 项系数与 γ_y 之间呈线性关系;相同条件下,当 γ_x 发生变化时, $Z_6(\text{defocus})$ 项系数与 γ_x 之间也呈线性关系,如图 5(e)~(h)所示。

2.2.3 物面光纤间距测量方法原理

根据仿真结果,测量物面光纤间距时,需要使用单一参数标定并多参数迭代计算的方式进行求解,具体如下:

按图 6 所示流程图,首先确定光纤出射端面的位置,建立间距测量的数学模型;然后,根据干涉波前相位求解 Zernike 多项式系数 Z_{oi} , i 分别取 1, 2, \dots , 9,同时按表 3 设定迭代计算初始参数,并将其设定为初次迭代计算当前值。图 6 中,下标 cur 代表当前值、cal 代表修正值。

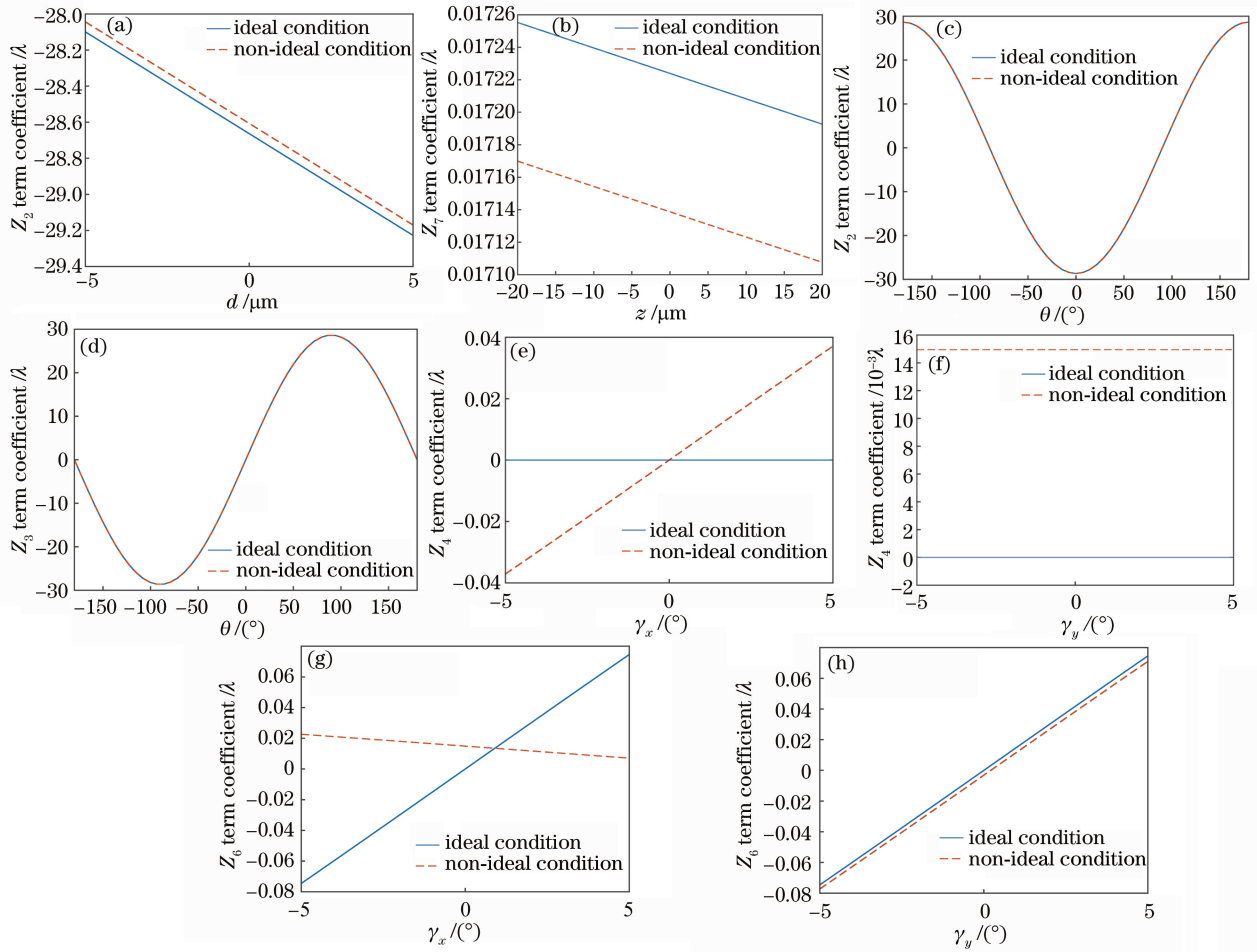


图 5 点光源间距及 CCD 相机空间位置参数与 Zernike 多项式系数之间的定量关系。(a)点光源间距与 Z_2 项系数的定量关系；(b)垂直距离与 Z_7 项系数的定量关系；(c) CCD 旋转角与 Z_2 项系数的定量关系；(d) CCD 旋转角与 Z_3 项系数的定量关系；(e) CCD 与 X 轴倾斜角与 Z_4 项系数的定量关系；(f) CCD 与 Y 轴倾斜角与 Z_4 项系数的定量关系；(g) CCD 与 X 轴倾斜角与 Z_6 项系数的定量关系；(h) CCD 与 Y 轴倾斜角与 Z_6 项系数的定量关系

Fig. 5 Quantitative relationship among point source separation distance, spatial location parameter of the CCD camera, and the Zernike polynomial coefficient. (a) Quantitative relationship between point source spacing and Z_2 term coefficient; (b) quantitative relationship between vertical distance and Z_7 term coefficient; (c) quantitative relationship between CCD rotation angle and Z_2 term coefficient; (d) quantitative relationship between CCD rotation angle and Z_3 term coefficient; (e) quantitative relationship between tilt angle of CCD and X axis and Z_4 term coefficient; (f) quantitative relationship between tilt angle of CCD and Y axis and Z_4 term coefficient; (g) quantitative relationship between tilt angle of CCD and X axis and Z_6 term coefficient; (h) quantitative relationship between tilt angle of CCD and Y axis and Z_6 term coefficient

表 3 迭代计算初始参数设定

Table 3 Initial parameter setting of iterative calculation

Initial parameter setting of iterative calculation	Setting value
d	Estimating rough value d_0 according to the position of fiber end
z	Using the tool to measure the rough value z_0
θ	Calculation according to the formula: $\theta = \tan^{-1}(-Z_{03}/Z_{02})$
γ_x	Setting to 0°
γ_y	Setting to 0°

然后,利用当前值代入(6)式并计算当前波前相位分布,拟合 Zernike 多项式得到 Z_i 项系数,记为 $Z_{i,cur}$,并求解 Zernike 多项式 Z_i 项系数关于所对应系统参数 X 的偏导数 $\frac{\partial Z_i}{\partial X}$,根据表 4 所示计算公式依次求解对应系统参数的修正值 X_{cal} ,并将 X_{cal} 设置为系统参数的当前值 X_{cur} 。其中 Z_{0i} 表示采集到的实际波前相位拟合 Zernike 多项式所得到的 Z_i 项系数, X 为系统参数 d 、 z 、 θ 、 γ_x 、 γ_y 的代表符号。

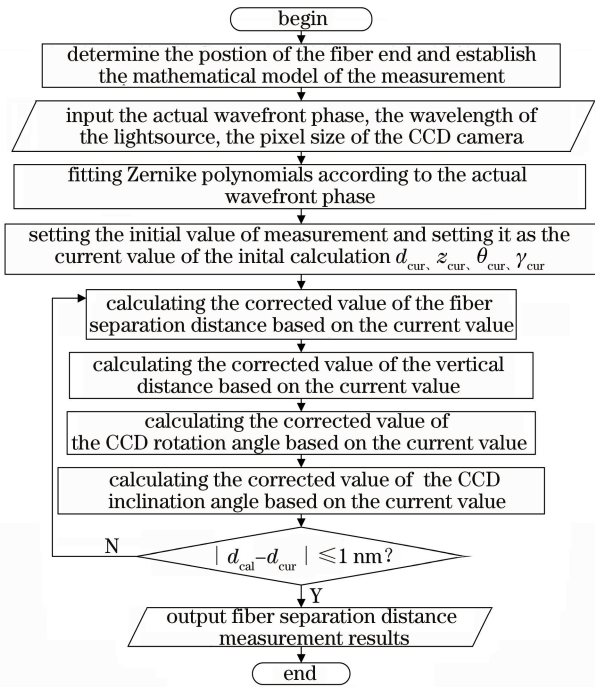


图 6 光纤间距测量算法流程图

Fig. 6 Flow chart of fiber spacing measurement algorithm

最后,重复上述步骤直至光纤间距修正值 d_{cal} 与 d_{cur} 的差异值小于 1 nm, 所得到的 d_{cal} 即为光纤

表 4 光纤间距及 CCD 相机空间位置参数与 Zernike 多项式系数的定量关系及其计算公式

Table 4 Quantitative relationship among two fibers separation distance, spatial position parameters of the CCD camera, and the Zernike polynomial coefficient, and its calculation formula

Parameter	Term of Zernike polynomial	Quantitative relationship type	Calculation formula
d	Z_2	Linear relationship	$d_{cal} = d_{cur} + (Z_{02} - Z_{2cur}) / \frac{\partial Z_2}{\partial d}$
z	Z_7	Linear relationship	$z_{cal} = z_{cur} + (Z_{07} - Z_{7cur}) / \frac{\partial Z_7}{\partial z}$
θ	Z_2	Cosine relationship	$\theta_{cal} = \theta_{cur} + (Z_{03} - Z_{3cur}) / \frac{\partial Z_3}{\partial \theta}$
	Z_3	Sine relationship	
γ_x	Z_4	Linear relationship	$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{x_{cal}} = \gamma_{x_{cur}} + (Z_{04} - Z_{4cur}) / \frac{\partial Z_4}{\partial \gamma_x} \\ \gamma_{y_{cal}} = \gamma_{y_{cur}} + (Z_{06} - \gamma_{x_{cal}} \times \frac{\partial Z_6}{\partial \gamma_x} - Z_{6cur}) / \frac{\partial Z_6}{\partial \gamma_y} \end{array} \right.$
	Z_6	Linear relationship	
γ_y	Z_4	Uncorrelated	
	Z_6	Linear relationship	

表 5 光纤间距测量方法有效性仿真分析结果

Table 5 Simulation results of the effectiveness of the method for measuring the separation distance between two fibers

	Average value	Standard deviation	Maximum value	Minimum value
Number of iterations	14.6000	0.4900	15.0000	14.0000
Measurement error of fiber separation distance / nm	0.5500	0.9337	5.0000	0

实验将 200 组仿真值的标准差作为方法使用过程中,初值设定不准确而引起的标准测量不确定度。仿真结果符合正态分布, σ 表示的是计算得到的多组数据的标准差, 1σ 表示的是该数据的置信区间。

间距纳米级精度测量值。

2.2.4 物面光纤间距测量方法仿真

为了检验上述算法的有效性,使用波长为 532 nm 的光源,有效像素数为 400 pixel \times 400 pixel、像素尺寸为 9.9 $\mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ 的 CCD 相机,设定随机生成 200 组的仿真数据,计算得到待测相位,使用 Matlab 软件对该方法进行数值仿真,以检验其可行性和稳定性。其中,光纤间距为 (254 $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$) 范围内产生的随机数,垂直距离为 (32.941 mm ± 0.5 mm) 范围内产生的随机数,CCD 旋转角和倾斜角均为 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 内产生的随机数。

考虑到实际测量过程中,在建立系统坐标系 O -XYZ 时,原点 O 会存在定位误差,因此,在仿真参数中添加原点 O 以像素为单位的定位误差,在 X 方向和 Y 方向上的偏移量为 $[-5 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}]$ 内产生的随机数。

对于迭代计算的初值设定,始终保持不变,分别为:光纤间距 $d = 254 \mu\text{m}$,垂直距离 $z = 30$ mm,旋转角 θ 根据 Z_{02} 和 Z_{03} 计算得到,CCD 与坐标轴的倾斜角 γ_x 和 γ_y 均设定为 0° 。最终仿真结果如表 5 所示。

仿真结果显示该方法能够较快地收敛,可实现光纤间距的快速测量。在快速测量的同时,也能实现高精度测量,标准测量不确定度为 0.93 nm (1σ)。进一步分析发现,光纤间距测量误差主要来自于垂直

距离 z 和 CCD 与 Y 轴倾斜角 γ_y 的标定误差。

2.3 像面光纤成像点间距测量

像面光纤成像点间距标定系统原理如图 7 所示,对于像面光纤像点间距的测量,当光纤输出端置于被测高精度成像系统的物方视场内,光纤输出端经过被测成像系统成像。此时,两个像点可以认为是两个点光源,因此采用测量物面光纤间距的方法来测量像面光纤成像点间距。两个像点产生的光场相互干涉,干涉图像被下方放置的 CCD 相机采集,通过相移法求解干涉相位,采用测量物面光纤间距的方法完成像面光纤像点间距的纳米级精度测量。对像面成像点间距测量误差进行仿真分析,得到光纤像点间距测量值的标准测量不确定度为 $0.12 \text{ nm}(1\sigma)$ 。

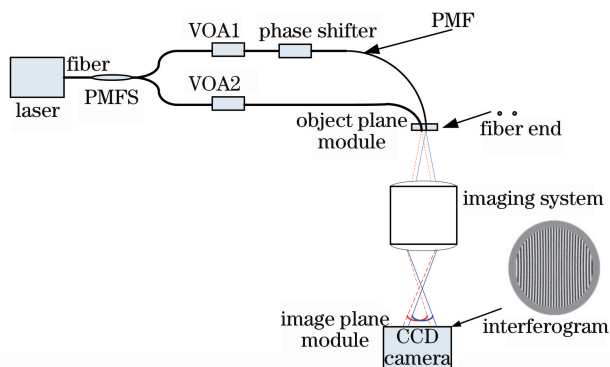


图 7 像面光纤成像点间距测量系统原理框图

Fig. 7 Schematic diagram of image plane fibers'

imaging points separation distance measurement system

3 实 验

为进一步验证该测量方法的可行性,进行了测量实验。实验系统的光源为 532 nm 半导体抽运全固态激光器,采用细径保偏光纤,光纤芯径为 $3 \mu\text{m}$; CCD 探测器像素数为 $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$,像素大小为 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ 。实验中使用的待测成像系统为显微物镜,名义倍率为 $1/5$,物方数值孔径 NA 为 0.06 ,像方 NA 为 0.3 。

3.1 实验与数据分析

3.1.1 光斑圆心定位

通过控制衰减器,实现两根光纤分别出光,并且一根光纤出光时保持另一根光纤处于不出光状态。用 CCD 探测器分别采集光纤 1 和光纤 2 出射的光斑图像,其中,物方采集的光斑图像为 A_1 和 A_2 ,像方采集的光斑图像为 A_1' 和 A_2' 。对物方采集到的实验图像采用最小二乘法拟合圆的方法,得到圆形光斑图像 A_1 、 A_2 的圆心像素坐标;对像方采集到的

实验图像采用最小二乘法拟合圆,得到圆形光斑图像 A_1' 和 A_2' 的圆心像素坐标,如图 8 所示。根据像素坐标值,分别求解得到物面光纤间距的粗测值 $d_0 = 297 \mu\text{m}$ 、像面光纤像点间距的粗测值 $d_0' = 49.5 \mu\text{m}$ 。

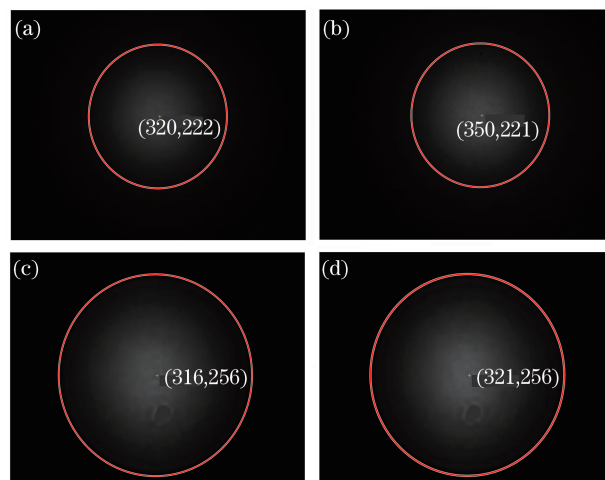


图 8 光斑圆心识别结果。(a)、(b)物方定位结果;
(c)、(d)像方定位结果

Fig. 8 Spot center recognition results. (a), (b) Object location results; (c), (d) image location results

3.1.2 光纤间距和 CCD 相机空间位置参数计算

以圆心位于面阵探测器坐标系原点 O 范围不超出光斑图像 A_1 (A_1') 和光斑图像 A_2 (A_2') 重合区域的圆作为分析计算的有效区域。采用相移法求解干涉相位,按照所建立的面阵探测器坐标系,对得到的干涉相位进行 Zernike 多项式前 9 项拟合,得到 Zernike 多项式系数值 $Z_{01}' \sim Z_{09}'$,实验波前及其 Zernike 系数值如图 9 所示。

实验过程中,计算物面光纤间距时,首先设定光纤间距和 CCD 相机空间位置参数的初始值,然后,进行迭代计算,求解光纤间距和 CCD 相机空间位置参数的精确值,最终得到光纤间距的准确计算值,物面迭代过程及计算结果如表 6 所示。其中,在物面光纤间距测量过程中,由于经过光纤衍射后的出射光所产生的光斑没有明显边界,在使用数字图像处理方法进行光斑中心定位时,容易产生光斑中心定位误差。而物面光纤间距的粗测值是根据两个光斑圆心的坐标值和单像素尺寸计算得到,进而导致了物面光纤间距粗测值的计算误差。

计算像面光纤像点间距时,同样先设定像面光纤像点间距和 CCD 相机空间位置参数的初始值,然后进行迭代计算,求解光纤像点间距和 CCD 相机空间位置参数的精确值,最终得到光纤像点间距的准确计算值,像面的迭代过程及计算结果如表 7 所示。

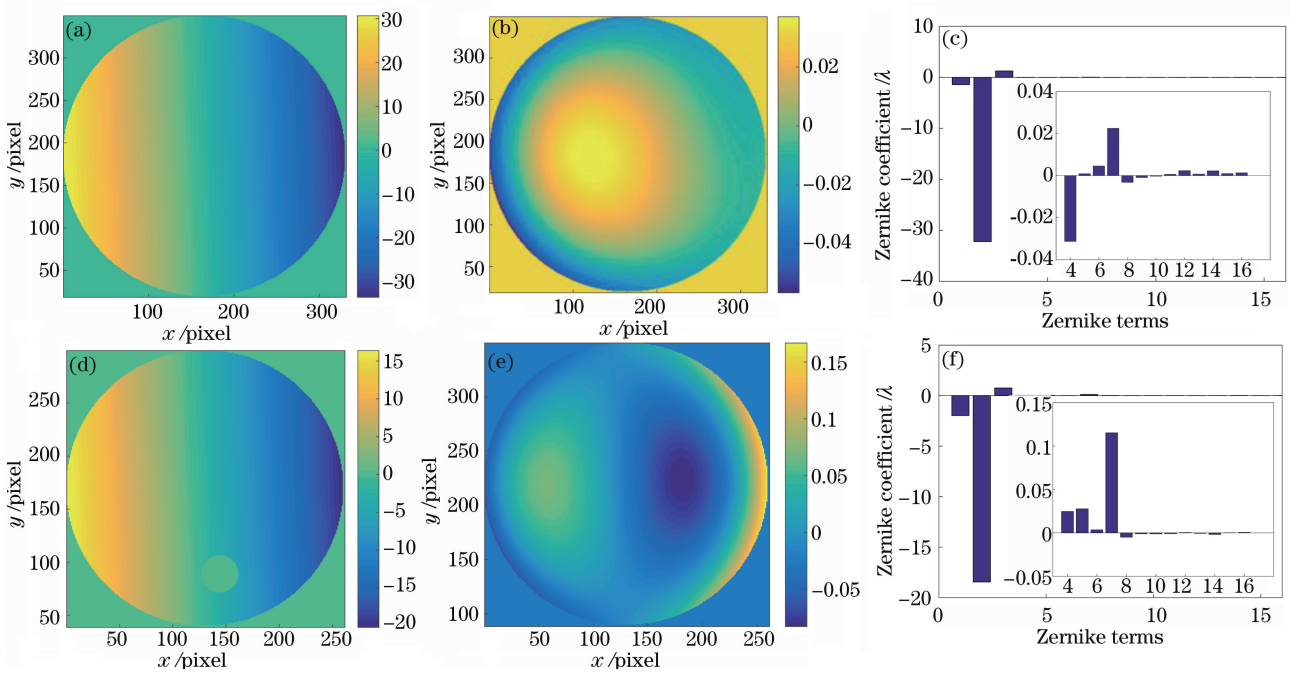


图 9 实验采集到的波前及其 Zernike 系数值。(a)物面波前；(b)物面波前(无倾斜项)；(c)物面波前的 Zernike 系数；(d)像面波前；(e)像面波前(无倾斜项)；(f)像面波前的 Zernike 系数

Fig. 9 Experimental wavefront and its Zernike coefficient values. (a) Object plane wavefront; (b) object plane wavefront (without tilt term); (c) Zernike coefficient of object plane wavefront; (d) image plane wavefront; (e) image plane wavefront (without tilt term); (f) Zernike coefficient of image plane wavefront

表 6 物面光纤间距迭代计算结果

Table 6 Iterative calculation results of object plane separation distance between fibers

Parameter	Initial value	1	2	3	...	10	11
$d / \mu\text{m}$	297.000	315.307	272.399	267.318	...	264.818	264.817
$z / \mu\text{m}$	30000.000	25877.260	25380.070	25219.260	...	25140.380	25140.350
$\theta / (^{\circ})$	2.231	1.925	2.188	2.217	...	2.231	2.231
$\gamma_x / (^{\circ})$	0	-3.050	-3.411	-3.433	...	-3.444	-3.444
$\gamma_y / (^{\circ})$	0	0.015	-0.015	-0.018	...	-0.020	-0.020

表 7 像面光纤像点间距迭代计算结果

Table 7 Iterative calculation results of image plane separation distance between fiber image points

Parameter	Initial value	1	2	3	...	6	7
$d / \mu\text{m}$	49.500	51.011	50.911	50.843	...	50.810	50.809
$z / \mu\text{m}$	6600.000	6584.231	6575.157	6572.180	...	6570.711	6570.667
$\theta / (^{\circ})$	2.357	2.352	2.354	2.356	...	2.357	2.357
$\gamma_x / (^{\circ})$	0	1.633	1.633	1.634	...	1.635	1.635
$\gamma_y / (^{\circ})$	0	0.249	0.249	0.249	...	0.250	0.250

3.1.3 倍率计算

根据测量结果,物面光纤间距为 $264.8170 \mu\text{m}$, 像面光纤像点间距为 $50.8090 \mu\text{m}$, 利用倍率的计算公式(1), 计算得到该成像系统的倍率为

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{50.8090 \mu\text{m}}{264.8170 \mu\text{m}} \approx 0.1918. \quad (7)$$

3.2 误差分析

成像系统倍率的测量误差来自于光纤间距和光

纤像点间距的测量误差, 而光纤间距和光纤像点间距的测量误差主要来源于实验波前 $Z_2(x\text{-tilt})$ 项系数的测量重复性所引起的误差和迭代计算初始值设定不准确所引起的误差。实验中 Zernike 多项式系数测量重复性 (1σ) 的测量结果如图 10 所示 (36 次连续重复测量得到的 Zernike 系数的标准差)。物面实验波前 $Z_2(x\text{-tilt})$ 项系数的测量重复性 $S_{Z_{02}}$ 在 0.010 nm 以内, 像面实验波前 $Z_2(x\text{-tilt})$ 项系数的

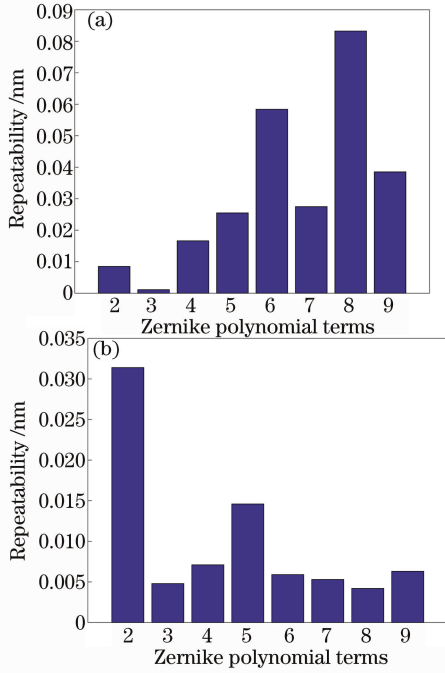


图 10 Zernike 多项式系数测量重复性。

(a)物面测量结果;(b)像面测量结果

Fig. 10 Measurement repeatability of Zernike polynomial coefficient. (a) Object plane measurement result; (b) image plane measurement result

测量重复性 $S_{Z_{02}'}$ 在 0.035 nm 以内。考虑物面光纤间距、像面光纤像点间距迭代计算初始值设定不准确所引发的测量不确定度 ($S_d = 0.9337$ nm, $S_{d'} = 0.1219$ nm), 则物面光纤间距和像面光纤像点间距的测量不确定度 S_y 、 $S_{y'}$ 分别为

$$S_y = \sqrt{S_{d_{cur}}^2 + (S_{Z_{02}'} / \left| \frac{\partial Z_2}{\partial d} \right|)^2} = \sqrt{0.9337^2 + (0.010/0.1216)^2} = 0.9373 \text{ nm}, \quad (8)$$

$$S_{y'} = \sqrt{S_{d_{cur}'}^2 + (S_{Z_{02}'} / \left| \frac{\partial Z_2'}{\partial d'} \right|)^2} = \sqrt{0.1219^2 + (0.0035/0.3631)^2} = 0.1223 \text{ nm}. \quad (9)$$

将(8)式、(9)式得到的结果代入倍率合成测量不确定度计算公式(2), 得到倍率的合成测量不确定度为

$$u_{cp} = \sqrt{\frac{S_{y'}^2 + \beta_0^2 S_y^2}{y_0^2}} = \sqrt{\frac{(0.1223 \text{ nm})^2 + (1/5 \times 0.9373 \text{ nm})^2}{(254 \mu\text{m})^2}} \approx 0.88 \times 10^{-6}. \quad (10)$$

包含因子 k 取 3, 对应的置信概率为 99%, 则倍率测量的扩展不确定度为

$$U_{cp} = k u_{cp} = 3 \times 0.88 \times 10^{-6} = 2.64 \times 10^{-6}. \quad (11)$$

4 结 论

本文提出了基于双光纤点衍射干涉仪的成像系统倍率高精度测量方法, 该方法使用双光纤点衍射干涉仪、待测成像系统和 CCD 相机搭建的测量系统完成倍率的高精度测量。通过建立测量系统的数学模型, 分析双点光源间距以及 CCD 相机空间位置与点衍射干涉场相位拟合得到的 Zernike 多项式系数之间的定量关系, 确定双点光源间距纳米级精度测量方案。利用该测量方案, 完成物面光纤间距和像面光纤像点间距的纳米级精度测量, 进而完成对倍率的高精度测量。仿真与实验结果显示, 双点光源间距的测量方法能够实现光纤间距快速且高精度的测量, 标准测量不确定度为 0.94 nm; 对于成像系统倍率的扩展测量不确定度达到 2.64×10^{-6} ($k=3$), 验证了该方法测量成像系统倍率的可行性。并且, 由数值仿真与实验数据可见, 倍率测量精度并没有受限于干涉仪的测量稳定性, 而是受限于测量系统光纤与 CCD 探测器间垂直距离 z , 及 CCD 与 Y 轴倾斜角 γ_y 等参数的初始值设定误差, 通过辅助手段提高系统参数初始值测量精度, 能进一步提高倍率测量精度至 0.3×10^{-6} 。

基于双光纤点衍射干涉仪的成像系统倍率高精度测量方法具有较高的测量精度、测量效率和测量可靠性, 并且测量系统结构简单, 有望成为一种通用的或可用于显微物镜和光刻投影物镜等高精度成像系统倍率超高精度测量的有效手段。

参 考 文 献

- [1] Gao B. Research on the large field projection lithograph lens[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 33-49.
高波. 大视场投影光刻物镜的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 33-49.
- [2] Xu W X, Qiao W D, Yang J D, et al. Study about distortion measurement of NFOV lens based on star point method[J]. Laser Technology, 2011, 35(5): 593-595.
许维星, 乔卫东, 杨建峰, 等. 基于星点法的小视场镜头畸变测量研究[J]. 激光技术, 2011, 35(5): 593-595.
- [3] Xu W C, Huang W, Yang W. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122003.
许伟才, 黄玮, 杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析

- 与补偿[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122003.
- [4] Deng C, Xing T W, Lin W M, *et al.* Design and simulation of large field plate lithography lens [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9685: 96850V.
- [5] Wang F, Wang X Z, Ma M Y, *et al.* An novel technique for measuring full image quality of lithography tools in situ [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(4): 543-548.
王帆, 王向朝, 马明英, 等. 一种新的光刻机多成像质量参数的原位检测技术[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 543-548.
- [6] Shi W J, Wang X J, Zhang D Q, *et al.* Method for measuring the lateral aberrations of a lithographic projection system with mirror-symmetric FOCAL marks [J]. Optical Engineering, 2006, 45(5): 53201.
- [7] Ma T, Shen Y B. Distortion detect of large field projection lithography lens [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(1): 46-49.
马韬, 沈亦兵. 大视场投影光刻物镜的畸变特性检测[J]. 光子学报, 2005, 34(1): 46-49.
- [8] van de Kerkhof M, Jasper H, Levasier L, *et al.* Enabling sub-10 nm node lithography: presenting the NXE: 3400B EUV scanner[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10143: 101430D.
- [9] Goldberg K A. Extreme ultraviolet interferometry [D]. Berkeley: University of California, 1997: 69-76.