

光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析

李杰^{1,2} 唐锋¹ 王向朝¹ 戴凤钊¹ 冯鹏¹

(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)

摘要 在分析光栅横向剪切干涉仪典型结构及系统参数配置, 给出其适用范围的基础上, 系统研究了该干涉仪结构最显著的系统误差: 几何光程误差和探测器倾斜误差。采用 Zernike 多项式给出波前重建前后系统误差项的解析表达式; 对其大小与被测数值孔径(NA)、衍射光会聚点间距 d 、剪切率 s 之间的关系进行了定量分析。几何光程彗差和像散、探测器倾斜像散和离焦是剪切干涉差分波前中最主要的误差项, 波前重建后主要导致几何光程球差和彗差, 探测器倾斜彗差。重建波前误差随着 NA 、 d 的增加而迅速增大, 随着 s 的减小而增大。特别是小剪切 ($s \leq 0.05$) 时, 波前重建对系统误差有增益效应, 重建波前的系统误差值远大于差分波前。小剪切情况下, 当 $d > 2 \mu\text{m}$ 、 $NA > 0.1$ 时, 重建波前误差的均方根值远大于 1 nm 。

关键词 测量; 光栅横向剪切干涉; 系统误差; Zernike 多项式; 光刻投影物镜

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0508006

System Errors Analysis of Grating Lateral Shearing Interferometer

Li Jie^{1,2} Tang Feng¹ Wang Xiangzhao¹ Dai Fengzhao¹ Feng Peng¹

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

Abstract Based on analysis of the typical structure and system configuration parameters of grating lateral shearing interferometer, we systematically study the most significant errors of the interferometer system: geometric optical path difference and detector tilt error. We give the analytical expression of systematic errors before and after wavefront reconstruction in the form of Zernike polynomials. The relationship between the system errors and the measured numerical aperture (NA), the distance of diffracted light converging point d , the shear ratio s are quantitatively analyzed. The most important errors for differential wavefront of shearing interferometer are the coma and astigmatism of geometric optical path difference, the astigmatism and defocus of detector tilt. These error terms will cause the errors of spherical aberration and coma of geometric optical path difference, the coma and astigmatism of detector tilt through wavefront reconstruction. The error of reconstructed wavefront increases rapidly with the increasing of NA 、 d , but increases with the decreasing of s . Especially, the wavefront reconstruction has gained effect on system errors with small shear ratio ($s \leq 0.05$), and the system errors of wavefront reconstruction is much larger than the differential wavefront. The root-mean-square (RMS) of reconstructed wavefront error is much greater than 1 nm under small shear ratio when $d > 2 \mu\text{m}$ 、 $NA > 0.1$.

Key words measurement; grating lateral shearing interferometer; systematic errors; Zernike polynomials; lithographic projection lens

OCIS codes 120.3180; 120.2650; 120.5050; 140.3300; 110.5220

1 引言

剪切干涉仪是一种典型的干涉仪结构, 具有结

构简单、准共光路、不需要标准参考元件等优点^[1-3]。光栅横向剪切干涉仪是一种使用光栅作为

收稿日期: 2013-11-13; 收到修改稿日期: 2013-12-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60938003、61205102、61275207)

作者简介: 李杰(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事干涉测量方面的研究。E-mail: ljieleej@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子学和高端光刻机技术等方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

分光元件的剪切干涉仪,其在很多领域得到了广泛的应用,如光束准直性检测、光学系统波像差测量和光学元件表面面形检测等^[2]。剪切干涉图直接反映的是被测波前的梯度信息,需要进一步从梯度信息中重建被测波前自身,因此剪切干涉数据处理过程较为复杂,传统上更多地应用于定性检测。20 世纪末,相移技术^[4]、傅里叶变换技术^[5]等现代干涉测量技术应用于光栅横向剪切干涉仪,剪切干涉波前重建技术也日趋成熟,光栅横向剪切干涉仪实现了高精度的定量测量,并应用于波前传感、光刻投影物镜波像差测量等领域^[6]。

对于典型的光栅横向剪切干涉仪,系统误差主要包括几何光程误差、探测器倾斜误差、光栅衍射误差、光栅倾斜误差、光栅位置变化误差等,其中几何光程误差、探测器倾斜误差的影响最为显著^[7-9]。对于光刻投影物镜波像差测量等高精度测量应用,几何光程误差、探测器倾斜误差等系统误差将大于被测量,系统误差的分析、标定及消除成为光栅横向剪切干涉仪实现高精度测量的关键因素之一。

本文分析了光栅横向剪切干涉仪的典型系统参数,推导并得到了空间几何光程误差及探测器倾斜导致的光程误差在波前重建前后的解析表达式,分析了上述系统误差项与系统数值孔径、会聚点间距、剪切率之间的定量关系,为光栅横向剪切干涉仪的设计及系统误差的标定、消除提供了依据。

2 光栅横向剪切干涉仪典型结构

光栅横向剪切干涉利用光栅衍射使被测波前横向平移后与被测波前自身在重叠区域内产生干涉,其典型结构如图 1 所示^[7,10-11]。光源发出的光经过物面小孔后,产生准理想球面波,该球面波经过被

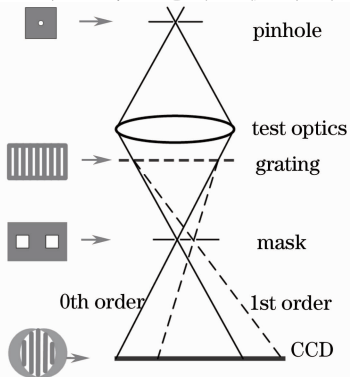


图 1 光栅横向剪切干涉仪典型结构

Fig. 1 Typical structure of grating lateral shearing interferometer

测系统后产生携带被测光学系统像差信息的畸变波前,该畸变波前经光栅衍射产生多级衍射光,通过双窗口掩模滤除 0 级和 1 级之外的衍射光,0 级和 1 级衍射光通过掩模并发生干涉,通过光电探测器获取干涉图。

对于非旋转对称波前,一般需要在正交方向上分别进行一次测量,获取两个相互垂直方向上的差分波前,然后进行波前重建。设被测波前 $W_t(x, y)$ 在 X, Y 方向横向平移的距离(剪切量)分别为 S_x, S_y , 横向平移后的波前分别表示为 $W_t(x + S_x, y), W_t(x, y + S_y)$, 则 X, Y 方向的差分波前 $\Delta W_x(x, y), \Delta W_y(x, y)$ 可分别表示为

$$\Delta W_x(x, y) = W_t(x + S_x, y) - W_t(x, y), \quad (1)$$

$$\Delta W_y(x, y) = W_t(x, y + S_y) - W_t(x, y), \quad (2)$$

将被测波前展开到前 J 项 Zernike 多项式^[12], 可得

$$W_t(x, y) = \sum_{j=1}^J a_j Z_j(x, y), \quad (3)$$

式中 Z_j 为第 j 项 Zernike 多项式, a_j 为相应的 Zernike 系数, 通过差分 Zernike 多项式拟合法、Rimmer-Wyant 法等方法进行波前重建, 可以从差分波前中获取被测波前^[2,13-15]。

3 光栅横向剪切干涉仪系统参数分析

如图 2 所示,光栅横向剪切干涉仪的系统参数主要包括被测光学系统的数值孔径(NA),剪切量 S ,剪切率 s ,光栅周期 T ,探测器(CCD)直径 D ,光源波长 λ ,干涉条纹数目 n ,不同级次衍射光的会聚点间距 d ,像面与光栅距离 z_1 ,像面与探测器距离 z_2 ,主光线入射角 θ_i ,+1 级光衍射角 θ_t 。假设参与干涉的光为 0 级与 +1 级衍射光,干涉区域充满探测器光敏区域。

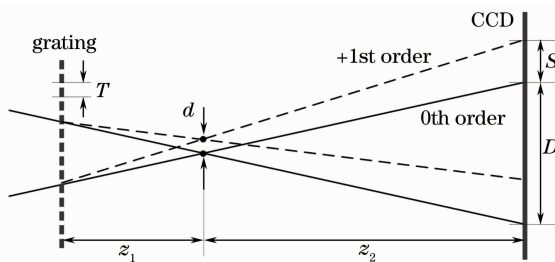


图 2 光栅横向剪切干涉仪的系统参数

Fig. 2 Parameters of grating lateral shearing interferometer

光栅 +1 级衍射角 θ_t 与入射角 θ_i 的关系可以表示为

$$T \sin \theta_t = T \sin \theta_i + \lambda. \quad (4)$$

由图2可知,剪切率 s 与 z_1 、 z_2 、 θ_i 、 θ_o 以及 D 、 T 的关系可以表示为

$$s = \frac{(z_1 + z_2)(\tan \theta_o - \tan \theta_i)}{D} \approx \frac{\lambda(z_1 + z_2)}{TD}. \quad (5)$$

光栅周期 T 与光源波长 λ 、探测器直径 D 、数值孔径 NA 、干涉条纹数目 n 以及剪切率 s 的关系可以表示为

$$T = \frac{\lambda D}{2sD \tan[\arcsin(NA) - n\lambda]} \approx \frac{\lambda D}{2sD \cdot NA - n\lambda}. \quad (6)$$

像面与剪切光栅和探测器的间距 z_1 和 z_2 可分别表示为

$$z_1 = \frac{nT}{2 \tan[\arcsin(NA)]} \approx \frac{n\lambda D}{2NA(2sD \cdot NA - n\lambda)}, \quad (7)$$

$$z_2 = \frac{D}{2 \tan[\arcsin(NA)]} \approx \frac{D}{2NA}. \quad (8)$$

0级和+1级衍射光的会聚点间距可以表示为

$$d \approx \frac{\lambda z_1}{T} \approx \frac{n\lambda}{2NA}. \quad (9)$$

测量系统中 λ 、 NA 、 D 为常数,剪切率 s 一般控

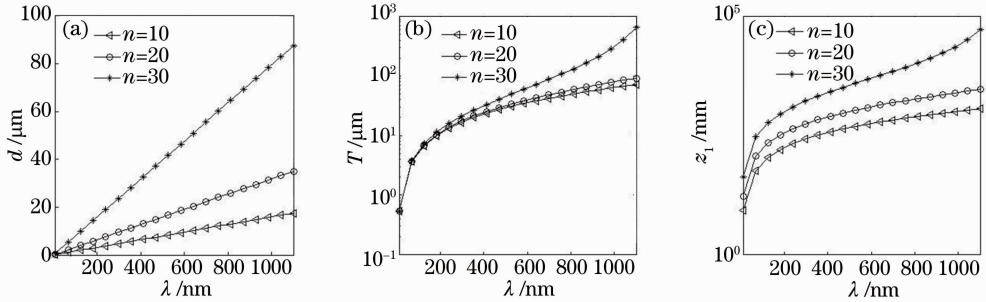


图3 光栅横向剪切干涉仪的系统参数随光源波长变化关系。(a) 0级与+1级衍射光会聚点间距 d ;
(b) 光栅周期 T ; (c) 光栅与像面的间距 z_1

Fig. 3 Relationship of system parameters with different wavelengths. (a) Distance of 0th order and +1st order diffracted light focuses; (b) grating pitch; (c) distance between grating and image plane

2) 数值孔径的变化对系统参数的影响

设探测器直径 $D=3.2$ mm,剪切率 $s=0.03$,干涉条纹数量为 10、20、50,数值孔径从 0.05 变化至 0.5 时,波长 $\lambda=633$ nm,干涉仪系统参数变化情况如图4所示。

随着数值孔径减小,光栅周期 T 、0级与+1级衍射光会聚点间距 d 、剪切光栅与像面间距 z_1 等系统参数非线性增大;当干涉条纹数目增多,小数值孔径时光栅周期 T 会出现负数解。因此,该干涉仪结

制在 1%~5% 之间^[16],最佳的干涉条纹的数目 n 与所采用的相位提取技术相关,当采用相移法时,干涉条纹数目越少越好,而采用空间载波方法时,干涉条纹数目一般需大于 50。

下面根据(1)~(3)式及约束条件(4)~(9)式,对光栅横向剪切干涉仪的光源波长 λ 、被测光学系统的数值孔径 NA 、剪切率 s 的取值对测量结果的影响进行量化分析。

1) 光源波长的变化对系统参数的影响

设被测系统 $NA=0.3$,探测器直径 $D=3.2$ mm,剪切率 $s=0.03$,干涉条纹数目 n 为 10、20、50,光源波长 λ 从 10 nm 变化至 1100 nm 时,系统参数 d 、 T 和 z_1 的变化情况如图3所示。

光源波长在 400~1000 nm 范围内时,随着波长增大,0级与+1级衍射光会聚点间距 d 、光栅周期 T 、光栅与像面距离 z_1 近似线性增大。当波长 λ 较小时,光栅周期 T 与干涉条纹数目 n 无关,而波长 λ 较大时,干涉条纹数目 n 的增大将导致光栅周期 T 及光栅与像面距离 z_1 快速增大,因此,此类干涉仪结构不适合用于大波长、高干涉条纹密度的情况。

构不适合小数值孔径、高干涉条纹密度的情况。

3) 剪切率 s 的变化对系统参数的影响

设探测器直径 $D=3.2$ mm,数值孔径 $NA=0.3$,干涉条纹数目为 10、20、50,剪切率 s 从 0.01 变化至 0.5 时,在不同光源波长下系统参数变化情况如图5所示。

可见,波长较大时,若剪切率 $s < 5\%$,光栅周期迅速增大,因此,该干涉仪结构也不适合于大波长、极小剪切率的情况。

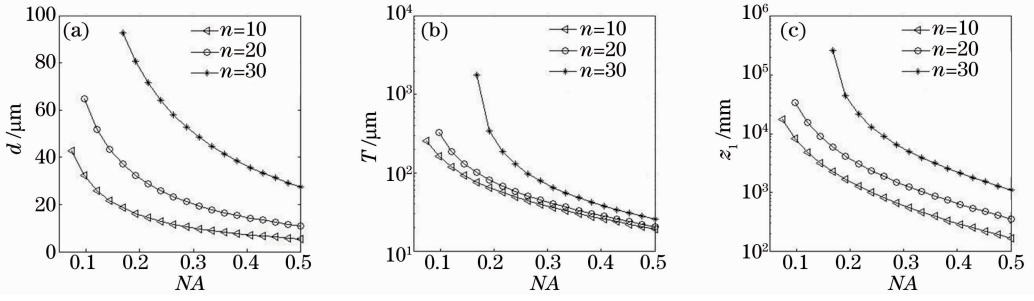


图 4 光栅横向剪切干涉仪系统参数取值随数值孔径的变化关系。(a) 0 级与 +1 级衍射光会聚点间距 d ；(b) 光栅周期 T ；(c) 光栅与像面间距 z_1

Fig. 4 Relationship of system parameters with different numerical apertures. (a) Distance of 0th order and +1st order diffracted light focuses; (b) grating pitch; (c) distance between grating and image plane

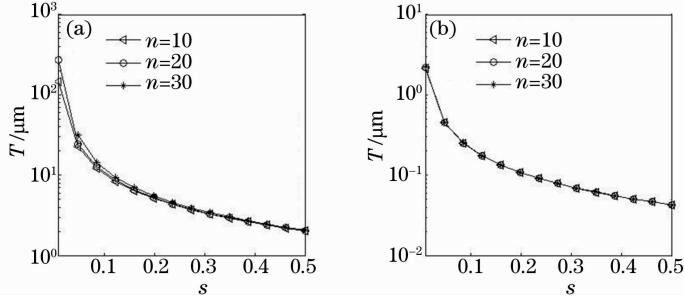


图 5 光栅周期 T 随剪切率的变化关系。(a) 波长 $\lambda=633$ nm；(b) 波长 $\lambda=13.5$ nm

Fig. 5 Relationship between grating pitch and shear ratio when wavelength is (a) $\lambda=633$ nm and (b) $\lambda=13.5$ nm

4 几何光程误差对波像差测量的影响

4.1 差分波前几何光程差的 Zernike 多项式分析

如图 6 所示,探测器在 X, Y 方向的倾斜角度分别为 ϕ_x, ϕ_y , (X, Y) 表示垂直于光轴的平面坐标系,用 (X_2, Y_2) 表示探测器平面内的坐标,则 (X, Y) 和 (X_2, Y_2) 的变换关系可以表示为

$$X = X_2 \cos \phi_x, \quad (10)$$

$$Y = Y_2 \cos \phi_y, \quad (11)$$

当 ϕ_x, ϕ_y 较小时,探测器上任意一点 (X_2, Y_2) 满足 $X \approx X_2, Y \approx Y_2, z \approx z_2 + X\phi_x + Y\phi_y$,其中 z_2 表示探测器中心至像面的距离。像面上不同级次衍射光的会聚点到探测器上任意一点的几何光程差(记为

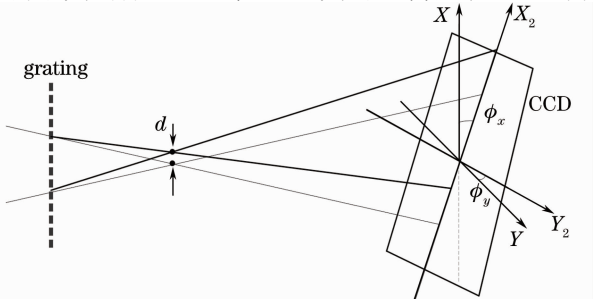


图 6 空间几何光程差和探测器倾斜

Fig. 6 Geometrical optical path difference and detector tilt

O_{PD}) 可以表示为

$$O_{PD}(X, Y) = \sqrt{(X+d)^2 + Y^2 + (z_2 + X\phi_x + Y\phi_y)^2} - \sqrt{X^2 + Y^2 + (z_2 + X\phi_x + Y\phi_y)^2}. \quad (12)$$

将几何光程差展开到 Zernike 多项式,为便于分析,只采用前 16 项 Zernike 多项式描述几何光程差,将 Zernike 系数小于 0.1 nm 的高阶项(第 17 项以上)予以忽略。图 7 给出了第 17 项以上高阶项可忽略时 NA 与 d 的取值范围,当 NA 和 d 的取值不满足高阶项 Zernike 系数小于 0.1 nm 的忽略条件

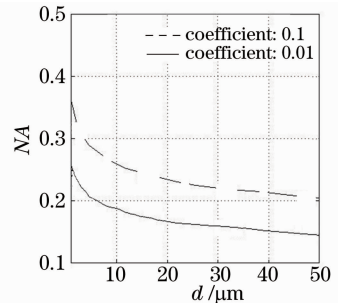


图 7 第 17 项之后的 Zernike 系数分别为 0.1 nm 和 0.01 nm 时, NA 和 d 之间的对应关系

Fig. 7 Relationship between NA and d when Zernike coefficients is 0.1 nm and 0.01 nm from 17th

时,需要采用更多项来描述几何光程误差。

采用 Zernike 多项式, X 方向几何光程误差可以表示为

$$\begin{aligned}
 O_{\text{PDr}}(x, y) = z_2 \left[\left(\frac{\delta^2}{2} - \frac{t^2 \delta^2}{4} + \frac{3t^4 \delta^2}{16} - \frac{5t^6 \delta^2}{32} - \frac{1}{4} t^2 \delta \phi_x \right) Z_1 + \left(t\delta - \frac{t^3 \delta}{3} + \frac{3t^5 \delta}{16} - \frac{t\delta^3}{2} + \frac{3t^3 \delta^3}{4} - \frac{15t^5 \delta^3}{16} \right) Z_2 + \right. \\
 \left. \left(-\frac{1}{4} t^2 \delta^2 + \frac{9t^4 \delta^2}{32} - \frac{9t^6 \delta^2}{32} - \frac{1}{4} t^2 \delta \phi_x \right) Z_4 + \left(-\frac{1}{4} t^2 \delta^2 + \frac{9t^4 \delta^2}{32} - \frac{1}{2} t^2 \delta \phi_x \right) Z_5 - \frac{1}{2} t^2 \delta \phi_y Z_6 + \right. \\
 \left. \left(-\frac{t^3 \delta}{6} + \frac{3t^5 \delta}{20} + \frac{3t^3 \delta^3}{8} - \frac{3t^5 \delta^3}{4} \right) Z_7 + \left(\frac{3t^4 \delta^2}{32} - \frac{5t^6 \delta^2}{32} \right) Z_9 + \frac{1}{8} t^3 \delta^3 Z_{10} + \frac{3}{32} t^4 \delta^2 Z_{12} + \right. \\
 \left. \left(\frac{3t^5 \delta}{80} - \frac{3t^5 \delta^3}{16} \right) Z_{14} - \frac{1}{32} t^6 \delta^2 Z_{16} \right], \quad (13)
 \end{aligned}$$

式中 $t = NA / \sqrt{1 - NA^2}$, $\delta = d / z_2$, Z_j 为第 j 项条纹 Zernike 多项式。同理, Y 方向几何光程误差可以表示为

$$\begin{aligned}
 O_{\text{PDy}}(x, y) = z_2 \left[\left(\frac{\delta^2}{2} - \frac{t^2 \delta^2}{4} + \frac{3t^4 \delta^2}{16} - \frac{5t^6 \delta^2}{32} - \frac{1}{4} t^2 \delta \phi_y \right) Z_1 + \left(t\delta - \frac{t^3 \delta}{3} + \frac{3t^5 \delta}{16} - \frac{t\delta^3}{2} + \frac{3t^3 \delta^3}{4} - \frac{15t^5 \delta^3}{16} \right) Z_3 + \right. \\
 \left. \left(-\frac{1}{4} t^2 \delta^2 + \frac{9t^4 \delta^2}{32} - \frac{9t^6 \delta^2}{32} - \frac{1}{4} t^2 \delta \phi_y \right) Z_4 + \left(\frac{t^2 \delta^2}{4} - \frac{9t^4 \delta^2}{32} + \frac{1}{2} t^2 \delta \phi_y \right) Z_5 - \frac{1}{2} t^2 \delta \phi_x Z_6 + \right. \\
 \left. \left(-\frac{t^3 \delta}{6} + \frac{3t^5 \delta}{20} + \frac{3t^3 \delta^3}{8} - \frac{3t^5 \delta^3}{4} \right) Z_8 + \left(\frac{3t^4 \delta^2}{32} - \frac{5t^6 \delta^2}{32} \right) Z_9 - \frac{1}{8} t^3 \delta^3 Z_{11} - \frac{3}{32} t^4 \delta^2 Z_{12} + \right. \\
 \left. \left(\frac{3t^5 \delta}{80} - \frac{3t^5 \delta^3}{16} \right) Z_{15} - \frac{1}{32} t^6 \delta^2 Z_{16} \right]. \quad (14)
 \end{aligned}$$

由(13)和(14)式可知, d 和 NA 决定了 Zernike 系数的大小。图 8 给出了探测器无倾斜时几何光程差的均方根(RMS)值分别 0.1、1、10 时 NA 与 d 的关系。

表 1 给出了探测器无倾斜、 $NA = 0.3$ 时, 会聚点间距 d 在 $1 \mu\text{m}$ 到 $50 \mu\text{m}$ 内取不同值时, 对应的前 16 项中较大的 Zernike 系数。

由表 1 可知, 几何光程误差主要包括直流项、倾斜、沿剪切方向的彗差以及绝对值相等的离焦、像散。图 9 给出了 X 方向几何光程差的像散 Z_5 、彗差 Z_7 、彗差 Z_{14} 的 Zernike 系数下 NA 随 d 的变化关系。

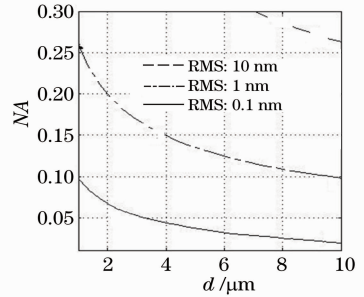


图 8 不同几何光程差的均方根值下 d 与 NA 的关系
Fig. 8 Relationship between d and NA when the root-mean-square of geometrical optical path difference varies

表 1 差分 Zernike 系数

Table 1 Differential Zernike coefficients

Zernike coefficients / nm	$d / \mu\text{m}$				
	1	10	20	50	
Z_1 (none)	0.0937	9.37	37.5	234.3	
Z_2, Z_3 (tilt)	304.7	3046	6093.8	15234	
Z_4 (defocus)	-0.0044	-0.44	-1.75	-10.93	
Z_5 (astigmatism)	X direction	-0.0044	-0.44	-1.75	-10.93
	Y direction	0.004	0.44	1.75	10.93
Z_7, Z_8 (3rd-order coma)	-4.72	-47.2	-94.4	-236.1	
Z_{14}, Z_{15} (5th-order coma)	0.101	1.01	2.02	5.05	

可见, 当 $NA > 0.1$ 或 $d > 4.5 \mu\text{m}$ 时, 彗差 a_{x7} (a_{y8}) 大于 0.1 nm ; 当 NA, d 变大时, 几何光程误差将影响多种像差, 如 $NA > 0.2, d > 10 \mu\text{m}$ 时, 几何光程差的像散 a_{x5} (a_{y5})、高阶彗差 a_{x14} (a_{y15}) 都将大于 0.1 nm 。

由(13)、(14)式可知, 当探测器倾斜时, 差分波前中存在离焦误差 Z_4 和像散误差 Z_5 , 其中离焦误差为像散误差的一半。探测器倾斜误差与倾斜角、 $t^2 d$ 成正比, 即与因子 $t^2 d \phi_x$ 或 $t^2 d \phi_y$ 成正比。图 10(a)、(b) 分别给出了 $t^2 d$ 与 NA, d 的关系及倾斜误差与 $t^2 d$ 、倾斜角度的关系。

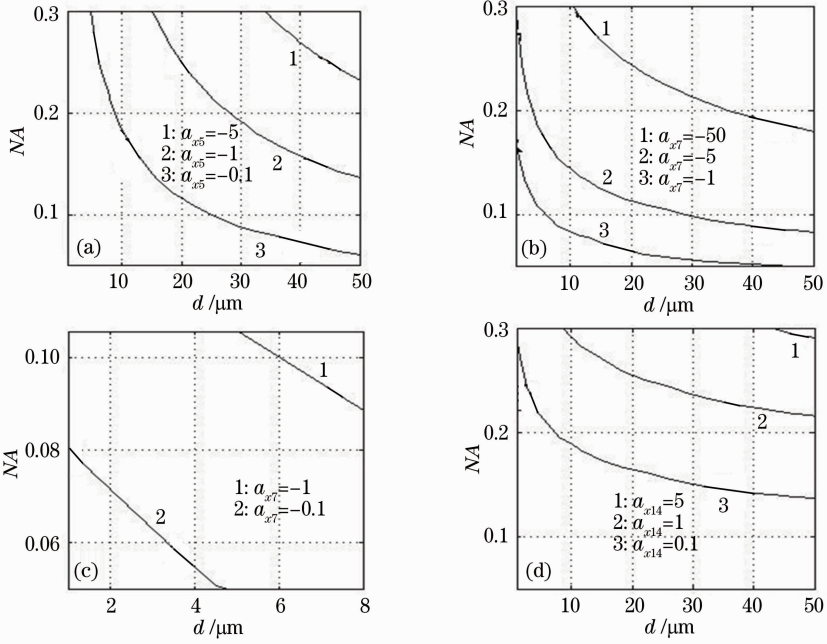


图 9 X 方向几何光程差的 Zernike 系数(a) a_{x5} , (b)~(c) a_{x7} , (d) a_{x14} 随 NA 和 d 的变化关系
Fig. 9 Relationship between NA and d Zernike coefficients (a) a_{x5} , (b)~(c) a_{x7} , (d) a_{x14}

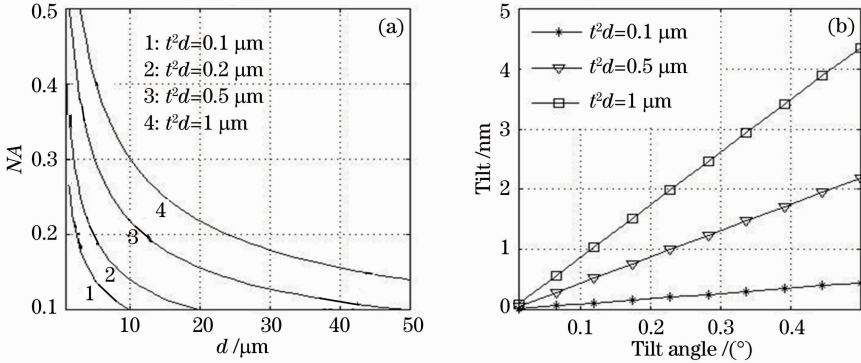


图 10 (a) t^2d 与 NA、 d 的关系; (b) 倾斜误差与 t^2d 、倾斜角度的关系

Fig. 10 (a) Relationship between t^2d and NA, d ; (b) relation between the errors of tilt and t^2d , tilt angle

探测器倾斜可以控制在 0.1° 以内, 从图 10(a)、(b) 可知, 仅在 $t^2d \leq 0.1 \mu\text{m}$ 时, 探测器倾斜导致的像散误差、离焦误差小于 0.1 nm , 是可以忽略的。

研究差分波前中系统误差的大小, 可在光栅剪切干涉仪设计时, 针对不同系统误差提出相应的标定、消除方法。下面将研究几何光程误差、探测器倾斜误差对重建波前的影响, 并讨论波前重建时剪切率的选取。

4.2 几何光程差的波前重建

根据 Rimmer-Wyant 方法, 使用 Zernike 多项式作为被测波前的基函数, 将差分波前展开到

Zernike 多项式。X、Y 方向差分波前的 Zernike 系数分别用向量表示为 \mathbf{a}_x 、 \mathbf{a}_y , 与被测波前的 Zernike 系数 \mathbf{a} 的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_x \\ \mathbf{a}_y \end{bmatrix} = \mathbf{M}\mathbf{a}, \quad (15)$$

式中 $\mathbf{a}_x = [a_{x1}, a_{x2}, \dots, a_{xj}]^T$, $\mathbf{a}_y = [a_{y1}, a_{y2}, \dots, a_{yj}]^T$, a_{xj} 、 a_{yj} 分别为 X、Y 方向差分波前的第 j 项 Zernike 系数, 剪切矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_x \\ \mathbf{M}_y \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{M}_x = \begin{bmatrix} s & 0 & 2s^2 & s^2 & \cdots \\ 0 & 0 & 4s & 2s & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_y = \begin{bmatrix} 0 & s & 2s^2 - s^2 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & 4s & -2s & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots \end{bmatrix}. \quad (17)$$

被测波前的 Zernike 系数可以表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{M}^\dagger \begin{bmatrix} \mathbf{a}_x \\ \mathbf{a}_y \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中 \mathbf{M}^\dagger 为 \mathbf{M} 的广义逆矩阵, $\mathbf{M}^\dagger = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T$ 。

将几何光程差进行波前重建,重建波前的 Zernike 系数中除去 $a_1 \sim a_4$ 后较大的五项分别为像散 a_5 、 a_6 、慧差 a_7 、 a_8 、球差 a_9 ,重建的波前 Zernike 系数 \mathbf{a} 与差分波前 Zernike 系数 \mathbf{a}_x 、 \mathbf{a}_y 、 s 的关系为

$$\begin{cases} a_5 = \frac{-4a_{x2} + 4a_{y3} + a_{x7} - a_{y8} + 4a_{x4}s + 6a_{x5}s - 2a_{x6}s - 4a_{y4}s + 6a_{y5}s + 2a_{y6}s + \cdots}{48s + 312s^3 + \cdots} \\ a_6 = \frac{-4a_{x4} + 2a_{x5} - 46a_{x6} - 4a_{y4} - 2a_{y5} - 46a_{y6} + 3a_{x7}s + 3a_{y8}s + 3a_{y15}s + 3a_{x14}s + \cdots}{192 + 1344s^2 + \cdots} \\ a_7 = \frac{40a_{x4} + 40a_{x5} + 40a_{y6} - 24a_{x9} - 129a_{x7}s + 9a_{y8}s + \cdots}{360s + 4860s^3 + \cdots} \\ a_8 = \frac{40a_{y4} - 40a_{y5} + 40a_{x6} - 24a_{y9} + 9a_{x7}s - 129a_{y8}s + \cdots}{360s + 4860s^3 + \cdots} \\ a_9 = \frac{12a_{x7} + 12a_{y8} - 8a_{x14} - 8a_{y15} + 2a_{x4}s - a_{x5}s - a_{x6}s + 2a_{y4}s + a_{y5}s - a_{y6}s + \cdots}{192s + 1344s^3 + \cdots} \end{cases}, \quad (19)$$

可见,差分波前 Zernike 系数 a_{xj} 、 a_{yj} 对重建的波前 Zernike 系数 \mathbf{a} 的影响程度由剪切率 s 决定。重建波前任一项 Zernike 系数由多项差分波前低阶和高阶 Zernike 系数共同描述,这是由于原始波前的任一高阶项产生多项差分波前的低阶项,并且,差分波前的同一低阶项由原始波前的多项高阶项产生。

4.3 剪切干涉几何光程误差分析

在 $s=0.03$ 、探测器无倾斜时,将几何光程差的 Zernike 多项式 $Z_5 \sim Z_{16}$ 进行波前重建,重建波前的 RMS 值与 NA 、 d 的关系如图 11 所示。

与图 8 相比较可见,波前重建后,几何光程误差

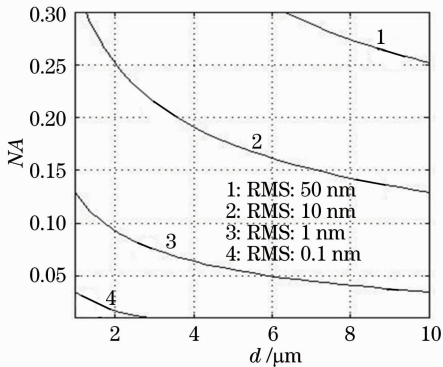


图 11 几何光程差的重建波前 RMS 值与 d 、 NA 的关系
Fig. 11 Relationship between RMS of reconstruction wavefront and d , NA

对重建波前的影响远大于对差分波前的影响,并且随着 NA 、 d 的增加,重建波前误差迅速增大。因此,有必要对 NA 、 d 及剪切率 s 与重建波前几何光程误差之间的关系进行分析。

4.3.1 几何光程差重建波前的像差分析

当探测器无倾斜时,选取系统参数 $s=0.03$ 、 $d=1 \mu\text{m}$,不同 NA 值时的重建波前误差 Zernike 系数如图 12 所示。选取 $s=0.03$ 、 $NA=0.3$,不同 d 值时的重建波前误差 Zernike 系数如图 13 所示。

由图 12、13 可知,对几何光程差进行波前重建,其 Zernike 系数主要为慧差 a_7 、球差 a_9 ,像散 a_5 、 a_6 可忽略。当 NA 增加时,重建波前的球差、慧差的绝对值将变大。当 d 增大时球差 a_9 的绝对值迅速增大,且与 d 近似成线性关系,其灵敏度系数近似为 $-t^3/(48s)$;慧差 a_7 随 d 增大呈抛物线变化。

根据差分波前的 Zernike 系数大小及其对重建波前 Zernike 系数的影响,可将 (19) 式中重建波前的慧差 a_7 、球差 a_9 的表达式简化为

$$\begin{cases} a_7 = \frac{40a_{x4} + 40a_{x5} - 129a_{x7}s + 9a_{y8}s}{360s + 4860s^3} \\ a_9 = \frac{3a_{x7} + 3a_{y8} - 2a_{x14} - 2a_{y15}}{48s + 336s^3} \end{cases}, \quad (20)$$

由表 1 及 (20) 式可知,球差 a_9 主要来源于差分波前中的慧差,慧差 a_7 主要来源于差分波前中的离焦、

像散和慧差。选取剪切率 s 从 0.01 变化至 0.3 时, 差分波前的像差对重建波前的影响随剪切率的变化

关系如图 14 所示。

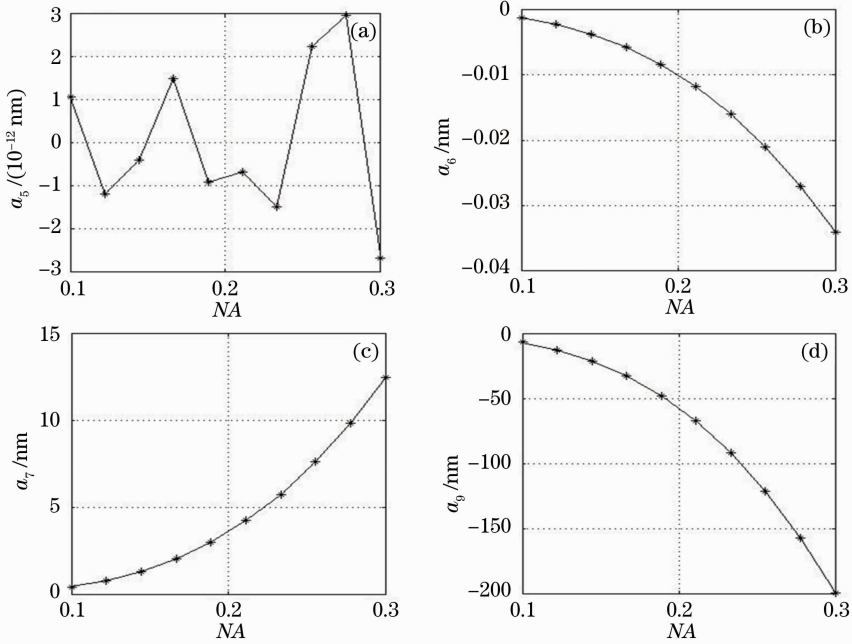


图 12 重建波前的 Zernike 系数(a) a_5 , (b) a_6 , (c) a_7 , (d) a_9 与 NA 的关系

Fig. 12 Relationship between Zernike coefficients of reconstruction wavefront (a) a_5 , (b) a_6 , (c) a_7 , (d) a_9 and NA

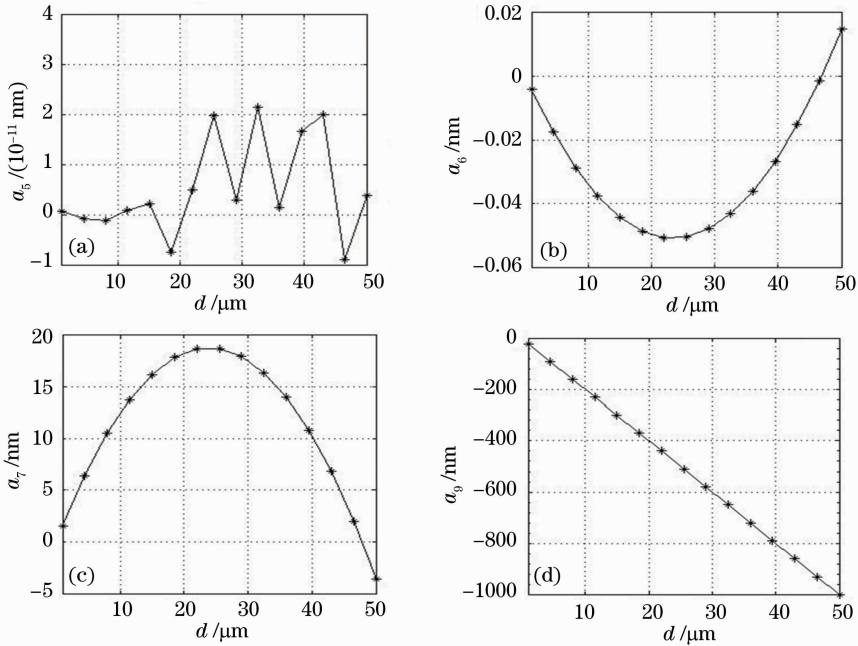


图 13 重建波前的 Zernike 系数(a) a_5 , (b) a_6 , (c) a_7 , (d) a_9 与 d 的关系

Fig. 13 Relationship between Zernike coefficients of reconstructed wavefront (a) a_5 , (b) a_6 , (c) a_7 , (d) a_9 and d

可见, 差分波前的慧差 a_{x7} 、 a_{y8} 对重建波前中慧差 a_7 的影响几乎与剪切率无关, 而离焦 a_{x4} 、像散 a_{x5} 的影响随剪切率 s 增大快速减小; 差分波前的慧差对重建波前中球差 a_9 的影响随剪切率 s 增大快速减小。可得, 几何光程误差对重建波前像差的影

响随着剪切率 s 的减小而增大, 特别是当剪切率 $s < 0.05$ 时, 波前重建对几何光程误差有增益效应; 同等条件下选择较大的剪切率 s 可降低几何光程差对重建波前的影响。

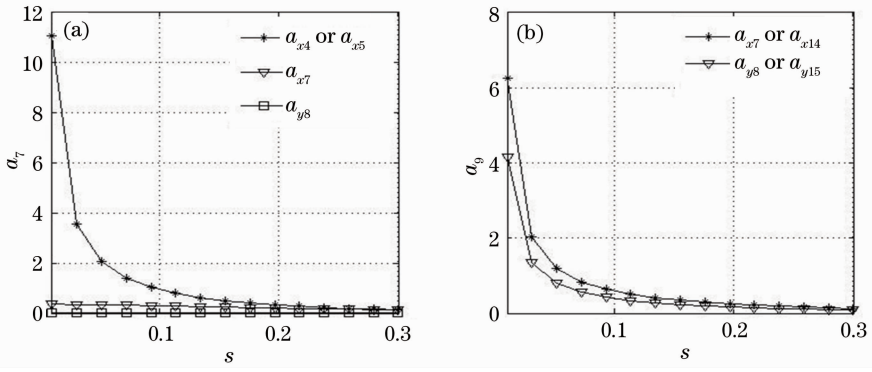


图 14 差分波前的 Zernike 系数对重建波前(a) a_7 和(b) a_9 的影响与 s 的关系

Fig. 14 Relationship between impact of Zernike coefficients of differential wavefront on reconstructed wavefront (a) a_7 and (b) a_9 and s

4.3.2 探测器倾斜致像差分析

探测器倾斜将影响差分波前中的离焦 Z_4 、像散 Z_5 ，波前重建时，将影响被测波前的像散 Z_5 、 Z_6 、慧差 Z_7 、 Z_8 、球差 Z_9 等。当探测器倾斜角 ϕ_x 、 ϕ_y 绝对值小于 5° 时， $\tan \phi_x \approx \phi_x$ 、 $\tan \phi_y \approx \phi_y$ ，将探测器倾斜导致的重建波前中的像散、慧差、球差的误差分别表示为

$$\begin{cases} \Delta a_5 = \frac{5t^2 d(-\phi_x + \phi_y)}{48 + 312s^2}, & \Delta a_6 = \frac{23t^2 d(\phi_x + \phi_y)}{192 + 1344s^2}, & \Delta a_7 = -\frac{5t^2 d\phi_x}{36s + 486s^3}, \\ \Delta a_8 = -\frac{5t^2 d\phi_y}{36s + 486s^3}, & \Delta a_9 = \frac{t^2 d(\phi_x + \phi_y)}{384 + 2688s^2}, \end{cases} \quad (21)$$

由(21)式可知，探测器倾斜对像差的影响分别与 $t^2 d$ 、倾斜角成线性关系，倾斜误差对重建波前系数的影响与剪切率 s 相关。

选取 $s=0.03$ ， $t^2 d$ 在 $0.1 \mu\text{m}$ 到 $1 \mu\text{m}$ 范围内[见图 10(a)中 NA 、 d 对应的取值范围]、 ϕ_x ($0.01^\circ \sim 0.5^\circ$)、

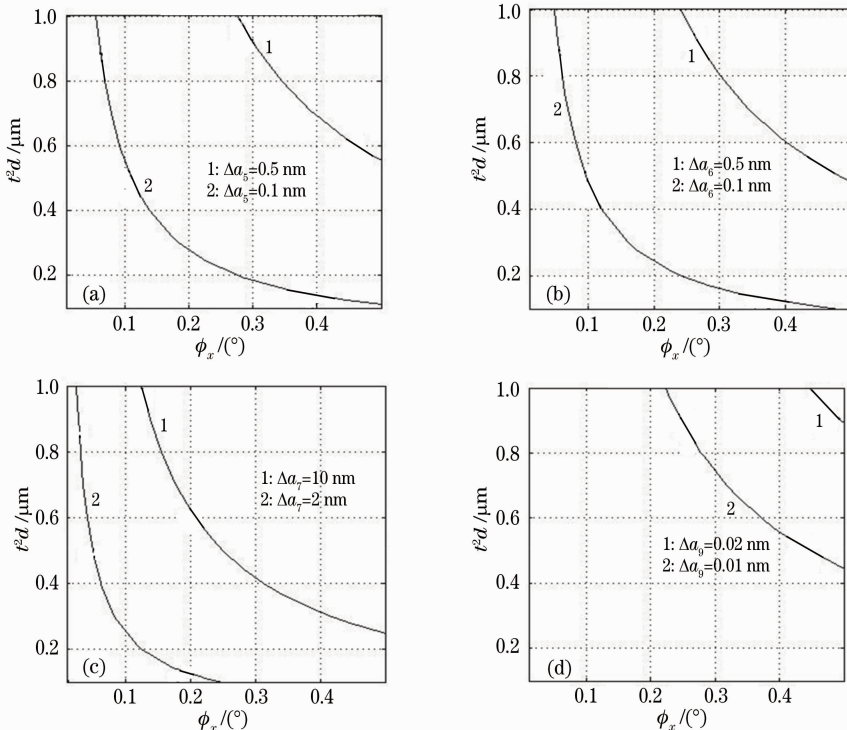


图 15 探测器倾斜对重建波前像差的影响。(a) a_5 ；(b) a_6 ；(c) a_7 ；(d) a_9

Fig. 15 Detector misalignment introduces aberration error of (a) a_5 ；(b) a_6 ；(c) a_7 ；(d) a_9

$\phi_y = 0$ 时,探测器倾斜对像差的影响如图 15 所示。

由图 15 可知,倾斜对重建波前的彗差 a_7 、像散 a_5 、 a_6 的影响最为显著。当探测器倾斜角度控制在 0.1° 以内时,像散 a_5 、 a_6 的误差一般可小于 0.1 nm ,重点考虑探测器倾斜彗差的影响。

当探测器倾斜角度 ϕ_x 为 0.1° , t^2d 从 $0.1 \mu\text{m}$ 变化至 $1 \mu\text{m}$,剪切率 s 从 0.01 变化至 0.3 时,探测器倾斜导致彗差的变化如图 16 所示。

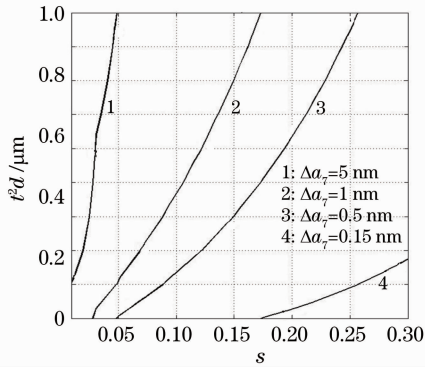


图 16 探测器倾斜导致彗差 a_7 的误差大小与剪切率 s 的关系

Fig. 16 Relationship between the error of a_7 with detector tilt and shear ratio

可见,在大多数光栅剪切干涉仪中(剪切率 $s < 0.2$),探测器倾斜导致的重建波前彗差误差大于 0.1 nm ,且剪切率越小,同等条件下探测器倾斜时彗差误差越大。

5 结 论

光栅横向剪切干涉仪是横向剪切干涉仪的一种重要类型,通过分析该干涉仪的系统参数,给出了光栅剪切干涉仪的适用范围,得出该干涉仪结构不适合测量大波长、小剪切率、小数值孔径、高条纹密度等条件下的波像差。

在此基础上,采用 Zernike 多项式系统研究该干涉仪结构最显著的系统误差:几何光程误差和探测器倾斜误差;在重建波前中主要表现为几何光程球差和彗差,探测器倾斜彗差和像散。上述系统误差随着 NA 、 d 的增加而迅速增大;几何光程球差、探测器倾斜彗差的大小与 d 近似呈线性关系。探测器倾斜彗差和像散的大小与倾斜角度呈线性关系,当探测器倾斜角度 ϕ_x (ϕ_y) 控制在 0.1° 以内时,探测器倾斜像散小于 0.1 nm ,可忽略。

上述系统误差随着剪切率 s 的减小而增大。特别是小剪切 ($s \leq 0.05$) 时,波前重建对系统误差有增

益效应,重建波前的系统误差值远大于差分波前。小剪切情况下,当 $d > 2 \mu\text{m}$ 、 $NA > 0.1$ 时,重建波前误差 RMS 值远大于 1 nm 。系统误差消除成为高精度检测中的关键技术环节。

本文工作为光栅剪切干涉仪的设计以及波像差检测中系统误差的标定、消除提供了依据。后续将进一步研究剪切干涉仪系统误差的标定、消除方法,提高波像差测量精度。

参 考 文 献

- Malacara D. Optical Shop Testing [M]. United States: John Wiley & Sons, 2007. 108-111.
- Dai F, Tang F, Wang X, *et al.*. Modal wavefront reconstruction based on Zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms[J]. Appl Opt, 2012, 51(21): 5028-5037.
- Zhang Chen, Liu Chunling, Li Dahai, *et al.*. Study of calibration method of radial shearing interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s112001.
章 辰, 刘春玲, 李大海, 等. 径向剪切干涉术的标定算法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s112001.
- Donald J Bone, H A Bachor, Sandeman R J. Fringe pattern analysis using 2D Fourier transform[J]. Appl Opt, 1986, 25(10): 1653-1660.
- Roddier F, Roddier C. Wavefront reconstruction using iterative Fourier transforms[J]. Appl Opt, 1991, 30(11): 1325-1327.
- Naulleau P P, Goldberg K A, Bokor J. Extreme ultraviolet carrier-frequency shearing interferometry of a lithographic four-mirror optical system[J]. J Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2000, 18(6): 2939-2943.
- Miyakawa R H. Wavefront Metrology for High Resolution Optical Systems[D]. Berkeley: University of California, 2011. 44-52.
- Liu Z, Sugisaki K, Ishii M, *et al.*. Astigmatism measurement by lateral shearing interferometer [J]. J Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2004, 22(6): 2980-2983.
- Goldberg K A. Extreme Ultraviolet Interferometry [D]. Berkeley: University of California, 1997. 74-84.
- Liu Z, Sugisaki K, Zhu Y, *et al.*. Double-grating lateral shearing interferometer for extreme ultraviolet lithography[J]. Jpn J Appl Phys, 2004, 43(6): 3718-3721.
- Sugisaki K, Hasegawa M, Okada M, *et al.*. EUVA's Challenges Toward 0.1 nm Accuracy in EUV at-Wavelength Interferometry [M]. Berlin: Springer, 2006. 252-266.
- Harbers G, Kunst P, Leibbrandt G. Analysis of lateral shearing interferograms by use of Zernike polynomials[J]. Appl Opt, 1996, 35(31): 6162-6172.
- Rimmer M P, Wyant J C. Evaluation of large aberrations using a lateral-shear interferometer having variable shear[J]. Appl Opt, 1975, 14(1): 142-150.
- Dai F, Tang F, Wang X, *et al.*. Generalized zonal wavefront reconstruction for high spatial resolution in lateral shearing interferometry[J]. J Opt Soc Am A, 2012, 29(9): 2038-2047.
- Dai F, Tang F, Wang X, *et al.*. Use of numerical orthogonal transformation for the Zernike analysis of lateral shearing interferograms[J]. Opt Express, 2012, 20(2): 1530-1544.
- Sugisaki K, Okada M, Otaki K, *et al.*. EUV wavefront measurement of six-mirror optics using EWMS[C]. SPIE, 2008, 69212U.