

文章编号 1004-924X(2015)06-1538-09

光栅点衍射干涉法检测 $\Phi 400$ mm 瞬态波前

李金鹏, 陈磊*, 万骏, 朱文华, 郑东晖
(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:提出了一种基于光栅点衍射干涉原理的 $\Phi 400$ mm 瞬态波前检测方法。该方法使用位相光栅在参考光与测试光中引入横向错位,即在干涉图中引入线性载频,然后利用傅里叶变换相位解调法提取待测波前。基于标量衍射理论以及傅里叶光学理论建立了瞬态波前检测方案的理论模型,推导了线性载频公式,研究了影响载频大小的因素;基于基尔霍夫公式分析了针孔衍射导致的孔径角变化与能量衰减效应,给出了位相光栅的刻蚀深度公式。实验搭建了 $\Phi 400$ mm 瞬态波前检测装置,采集了对比度良好的高线性载频干涉图。采用傅里叶变换相位解调法恢复波面,所得波面 RMS 值为 0.105λ 。与采用 SID-4 波前探测器测得的波面 RMS 值 (0.101λ) 基本一致,满足了 $\Phi 400$ mm 瞬态波前测量的要求。

关键词:光学测量;波前检测;瞬态波前;光栅点衍射干涉术;线性载频

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1538

Evaluation of $\Phi 400$ mm instantaneous wavefront using grating point diffraction interferometry

LI Jin-peng, CHEN Lei*, WAN Jun, ZHU Wen-hua, ZHENG Dong-hui

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: chenlei@njust.edu.com

Abstract: A method to measure $\Phi 400$ mm instantaneous wavefront based on grating point diffraction interferometry was proposed. The method introduced the lateral displacement into the test wavefront and reference wavefront by applying a phase grating, which means that a linear carrier was introduced in an interferogram. Then, the test wavefront was retrieved by Fourier Transform (FT). On the basis of scalar diffraction theory and Fourier optics theory, a theoretical model of instantaneous wavefront was established and the formula of linear carrier was derived. Furthermore, the effects of energy reducing and aperture angle changing due to pinhole diffraction were studied by using Kirchhoff formula, then the formula of grating etched depth was derived. An experimental installation of $\Phi 400$ mm instantaneous wavefront testing was set up and the interferogram with high modulation and a linear carrier was acquired. The FT method was applied to the restoration of the interferogram. The results indicate that the root mean square value of tested wavefront is 0.105λ , which is in accord with that of 0.101λ acquired by a SID-4 wavefront sensor. It concludes that the measurement of $\Phi 400$ mm instantaneous wavefront has been realized by this method.

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108041, No. U1231111)

Key words: optical testing; wavefront evaluation; instantaneous wavefront; grating point diffraction interferometry; linear carrier

1 引言

波前检测广泛应用于天文光学、强激光等领域^[1-2]。近年来,瞬态、大口径激光波前的检测成为这些领域的研究热点。在天文光学中,实时检测瞬态波前并根据测量结果控制波前误差并校正系统,可以达到消除大气湍流影响的目的^[3-4]。在激光武器的远距离传输、激光核聚变等强激光技术应用场合中,对大口径激光的波前相位畸变做高分辨检测,并根据测量结果优化激光系统,可提高激光系统的输出功率,改善光束质量^[5]。

干涉测量技术因具有分辨率高、精度高等优势而成为瞬态波前检测中的一个主要手段。目前,基于干涉测量原理的瞬态波前检测方法主要有剪切干涉术以及点衍射干涉术。基于剪切干涉术的瞬态波前检测通过恢复干涉图中包含的波面梯度信息并结合波前重构算法得到待测波面。李鸿儒等采用窗口傅里叶变换从径向剪切干涉图中得到了待测波前^[6]。刘蕾等结合光学偏振原理构建了可用于小口径光束波面检测的横向剪切干涉仪^[7]。Jerome Primotza 等结合 Hartmann-Shack 与横向剪切干涉仪提出了一种四波剪切波前检测方案^[8]。基于点衍射干涉术的瞬态波前检测同样采用解调干涉图的方式恢复待测波面,不同的是点衍射干涉图中包含的相位信息不是波面梯度,而是待测波前本身,相位恢复算法相对简单,在需要进行高分辨率、瞬态干涉图处理时可以降低数据处理时间,提高系统的频率响应特性。白福忠等搭建了一种基于 Mach-Zehnder 结构的同步移相点衍射干涉仪,用于测量自适应光学系统的波前^[9]。杜永兆等构建了一种环形共光路的点衍射干涉装置^[10],采用傅里叶变换法^[11]解调相位。吴亚琴等在环形共光路点衍射干涉仪中加入偏振掩模板改善了条纹对比度^[12]。美国劳伦斯伯克利国家重点实验室的 Medeck 等人提出了一种移相式光栅点衍射干涉仪^[13]光学检测系统,刘景峰等对该干涉仪中的关键技术进行了研究^[14]。此外,还有一些学者详细研究了点衍射干涉仪的系统误差以及优化方案^[15-16]。

本文提出了一种基于光栅点衍射干涉原理的 $\Phi 400$ mm 瞬态波前检测方法。该方法使用位相光栅在干涉图中引入载频,采用傅里叶相位解调法^[11]实现瞬态波前检测。为了满足大口径波前检测的高分辨、高精度要求,需要尽可能加大线性载频^[17],故本文针对高载频要求设计了系统参数,建立了系统理论模型研究了影响载频的因素。此外,为改善干涉图对比度,设计了位相光栅的刻蚀深度。

2 基于光栅点衍射的瞬态波前测量原理

基于光栅点衍射的瞬态波前测量原理如图 1 所示。

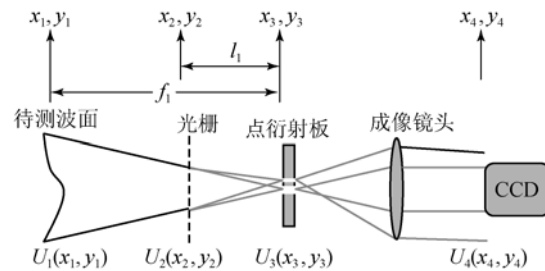


图 1 瞬态波前检测原理图

Fig. 1 Scheme of instantaneous wavefront evaluation

待测光束入射到一维光栅之后分成两路光,点衍射板产生参考光与测试光,并在 CCD 靶面处形成干涉,成像透镜对出瞳位置成像。利用标量衍射理论以及傅里叶光学相关理论建立了波前测量方案的理论模型。假设待测光波的光场复振幅分布为:

$$U_1(x_1, y_1) = \text{circle}\left\{\frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{d_1}\right\} e^{ikW(x_1, y_1)}, \quad (1)$$

式中: d_1 代表待测波前孔径, k 为波矢, $W(x_1, y_1)$ 为待测波面函数, $\text{circle}\{\}$ 为圆域函数。在标量衍射理论中,未放置光栅时 $x_3 - y_3$ 平面处的复振幅 $U_3(x_3, y_3)$ 可以看作是 $x_1 - y_1$ 平面处 $U_1(x_1, y_1)$ 上各个子波的相干叠加,也可以看作是 $x_2 - y_2$ 平面处 $U_2(x_2, y_2)$ 上各个子波的相干叠加,即有:

$$U_3(x_3, y_3) = FT\{U_2(x_2, y_2)\}_{u=\frac{x_3}{M_1}, v=\frac{y_3}{M_1}} = FT\{U_1(x_1, y_1)\}_{u=\frac{x_3}{M_1}, v=\frac{y_3}{M_1}}, \quad (2)$$

式中: l_1 为 x_2-y_2 平面到 x_3-y_3 平面的距离, f_1 为 x_1-y_1 平面到 x_3-y_3 平面的距离, $FT\{\}$ 为傅里叶变换函数, λ 为光波长。放置光栅时,若不考虑光栅厚度,光栅后表面处的光场复振幅分布 $U_2^+(x_2, y_2)$ 可由前表面振幅 $U_2^-(x_2, y_2)$ 乘以光栅透射函数得到。结合式(2),点衍射板前端的光场分布有:

$$U_3^-(x_3, y_3) = FT\{U_2^+(x_2, y_2)\}_{u=\frac{x_3}{\lambda f_1}, v=\frac{y_3}{\lambda f_1}} = FT\{U_1(x_1, y_1)\}_{u=\frac{x_3}{\lambda f_1}, v=\frac{y_3}{\lambda f_1}} \otimes T_{\text{grating}}(x_3), \quad (3)$$

式中: $T_{\text{grating}}(x_3) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_m \delta\left(x_3 - \frac{ml_1\lambda}{\Lambda}\right)$ 为光栅透射率函数的傅里叶变换,其中 Λ 为光栅常数, c_m 为光栅第 m 衍射级次的衍射效率, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。在 x_3-y_3 平面处能够看到一系列分立的光谱。点衍射板置于 x_3-y_3 平面,它的透过率函数为:

$$t_{\text{PDI}} = \text{circle}\left[\frac{\sqrt{x_3^2 + y_3^2}}{d_2}\right] + \text{circle}\left[\frac{\sqrt{(x_3 - l_1\lambda/\Lambda)^2 + y_3^2}}{d_3}\right], \quad (4)$$

式中: d_2 为透射窗孔径, d_3 为针孔孔径。此时光栅 0 级衍射光从透射窗透射而出, +1 级衍射光入射到针孔发生衍射。点衍射板后表面的复振幅分布 $U_3^+(x_3, y_3)$ 可由点衍射板前表面光场复振幅 $U_3^-(x_3, y_3)$ 乘以式(4)点衍射板透射函数得到。放置成像透镜使得点衍射板位于成像透镜的前焦面处,此时成像透镜具有傅里叶变换透镜的功能。结合式(1)、式(3)、式(4),忽略常数项进一步推导得到 CCD 靶面上的复振幅分布为:

$$U_4(x_4, y_4) = FT\{U_3^+(x_3, y_3)\}_{u'=\frac{x_4}{\lambda f_2}, v'=\frac{y_4}{\lambda f_2}} = FT\{U_3^-(x_3, y_3) \cdot t_{\text{PDI}}\}_{u'=\frac{x_4}{\lambda f_2}, v'=\frac{y_4}{\lambda f_2}} = c_0 \text{circle}\left[\frac{\sqrt{x_4^2 + y_4^2}}{f_2 d_1 / f_1}\right] \exp\left[ikW\left(-\frac{f_1}{f_2}x_4, -\frac{f_1}{f_2}y_4\right)\right] + c_{+1} 2\pi d_3 \times \exp[-i2\pi(x_4 l_1 / \Lambda f_2)] \times \frac{2J_1\left[(kd_3/2f_1)\sqrt{x_4^2 + y_4^2}\right]}{(kd_3/2f_1)\sqrt{x_4^2 + y_4^2}} \otimes \left\{\text{circle}\left[\frac{\sqrt{x_4^2 + y_4^2}}{f_2 d_1 / f_1}\right] \exp\left[ikW\left(-\frac{f_1}{f_2}x_4, -\frac{f_1}{f_2}y_4\right)\right]\right\}, \quad (5)$$

式中: c_0 与 c_{+1} 分别为光栅的 0 级衍射效率以及 +1 级衍射效率, J_1 为一阶贝塞尔函数, f_2 为成像透镜的焦距。

CCD 靶面处的复振幅分布可以看作待测波前复振幅分布与参考波前复振幅分布的叠加。参考波前的复振幅分布由针孔孔径函数与测试波前卷积而成,且参考波前包含倾斜相位,采用傅里叶变换相位解调法^[11]即可恢复待测波前。

3 实验与结果分析

3.1 实验

实验装置如图 2 所示,空间滤波器的作用是产生标准球面波,离轴抛物镜的作用为实现会聚波面与准直波面的相互转化,波前检测装置由光栅、点衍射板、成像镜头以及 CCD 构成。中心波长 $\lambda=532$ nm 的激光经过空间滤波器扩束后从分光镜透射而出,入射到离轴抛物镜($\Phi 400$ mm, $F_{\#}=10$)上,经离轴抛物镜准直入射到平面反射镜,由平面反射镜反射后回到离轴抛物镜,准直光束经过离轴抛物镜再次转变为会聚光束,形成待测波面。待测波面经分光镜反射入射到波前检测装置中。离轴抛物镜与反射镜之间的距离长达 5 m,离轴抛物镜距离检测系统 4 m。此时该系统为长腔长系统,极易受到气流的影响,所以利用波前检测装置测量的波前信息应包含系统误差与气流干扰造成的波前畸变。由于气流干扰随时间变化,该系统本身可以看作瞬态波面发生与检测装置。

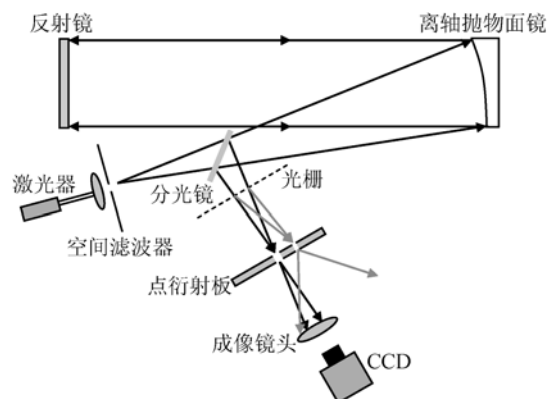
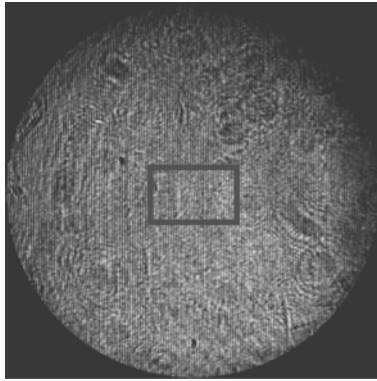


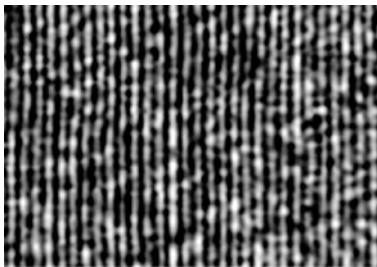
图 2 光栅点衍射干涉波前检测的实验装置图
Fig. 2 Experimental installation of wavefront detection using grating point diffraction interferometry

CCD采集到的一帧线性载频干涉图(分辨率为 $960 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$)如图3(a)所示,局部放大图如图3(b)所示。由图可知干涉图具有高线性载频特征。



(a) CCD采集到的干涉图

(a) Interferogram captured by CCD



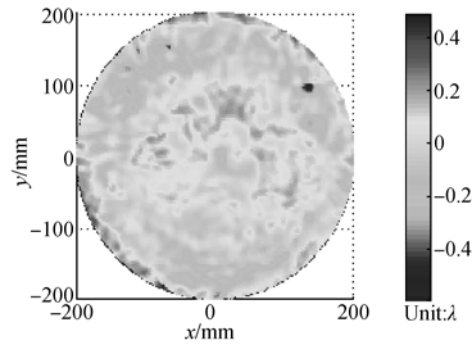
(b) 局部放大图

(b) Partial enlargement

图3 线性载频干涉图

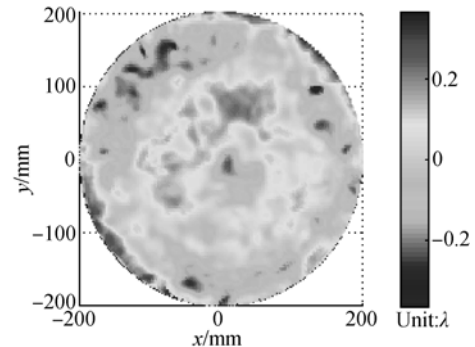
Fig. 3 Linear carrier interferograms

为验证检测方案的正确性,采用SID-4所测得的检测结果作为比对基准。SID-4是一款Phasic公司研制的波前探测器,其原理基于Hartmann检验以及四波剪切干涉术^[8],RMS精度达到 10 nm ,满分辨率测量频率为 10 frame/s ,测量分辨率为 $160 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$ 。由于单次测量包含了系统误差以及气流扰动造成的波前畸变,故取50次连续测量结果的平均值,以减小气流对测量的影响,此时测量结果主要包含系统误差造成的波前畸变。本文方法测得的波面如图4(a)所示,PV值为 1.09λ ,RMS为 0.105λ ;SID-4测得波面如图4(b)所示,PV值为 0.74λ ,RMS值为 0.101λ ;两者之差如图4(c)所示,PV值为 0.48λ ,RMS值为 0.046λ 。由此可知所提方法与SID-4测量结果基本一致,而且从图4(a)中可以看出本文方法保留了大量的波面细节信息。



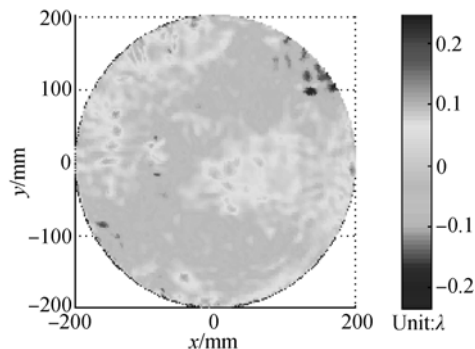
(a) 所提方案测得波面

(a) Wavefront obtained by proposed method



(b) SID-4 测得波面

(b) Wavefront obtained by SID-4



(c) 差值波面

(c) Difference wavefront

图4 实验结果

Fig. 4 Experimental results

3.2 结果分析

由图4可知,波前检测结果主要为系统误差造成的波前畸变。波前检测装置基本为共光路系统,点衍射板针孔衍射可以得到质量较高的参考波前,所引入的误差可以忽略不计。激光器本身携带的波前像差已被空间滤波器滤除,也可以忽略不计。因此波前畸变主要由分光镜、反射镜以及离轴抛物镜引入。

本实验采用了美国Thorlabs公司生产的

BP245B1 薄膜分光镜。该分光镜对准直光束造成的波前畸变小于 $\lambda/10$ 。然而实验中它被置于会聚光路中,而薄膜分光镜可看作平行平板,故会进一步导致波前畸变。薄膜分光镜厚度为 $2\ \mu\text{m}$,与系统光轴夹角为 45° ,光束波长为 $532\ \text{nm}$, F 数为 $F/10$ 。使用 Zemax 分析引入的波前畸变如图 5 所示,波前畸变主要为像散,其 PV 值为 0.0013λ , RMS 值为 0.0003λ 。误差很小,可以忽略不计。

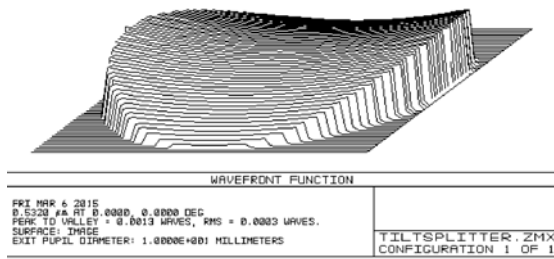


图 5 薄膜分光镜导致的波前畸变

Fig. 5 Wavefront distortion caused by beamsplitter

作为反射型元件,离轴抛物镜与反射镜的面形偏差也会导致波前畸变。有研究指出,离轴抛物镜的偏摆、俯仰以及旋转方向的离焦对波前畸变有较为明显的影响^[18]。因此所测得的波前结果主要包含离轴抛物镜、反射镜面形偏差,以及离轴抛物镜调整偏差导致的波前畸变。

4 讨论

4.1 载频的影响因素

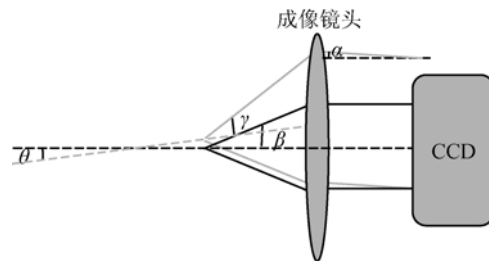
为了增加波前检测的载频,本节探讨了影响载频大小的因素。傅里叶变换相位解调法中,载频是影响精度的重要因素。载频增大将增大 1 级相位谱、0 级背景之间距离,从而减弱频率交混叠的影响^[1]。此外有研究指出干涉图的条纹数越多获得的细节分辨能力越高,相位解调结果与移相算法越一致^[17]。

根据式(5)载频项为 $k(x_1 l_1 / \Delta f_2)$,可以得到引入的最大载频相位为:

$$\varphi_{\text{c-max}} = k \frac{l_1 [\max(x_1) - \min(x_1)]}{\Delta f_2} = \frac{k l_1}{\Delta F_{\#}}, \quad (6)$$

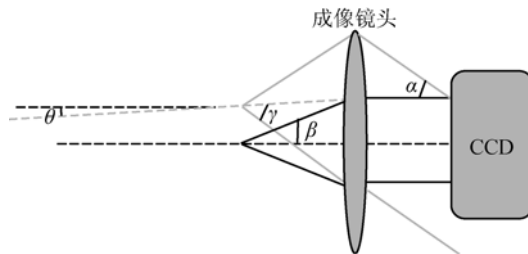
式中: $F_{\#}$ 为待测光束的 F 数。因此线性条纹数与光栅到点衍射板的距离 l_1 成正比,与光栅常数 Δ 、待测波面 F 数成反比。根据式(6)可知,光栅常数 Δ 设计为 $33\ \mu\text{m}$,光栅到点衍射板的距离 l_1 设计为 $50\ \text{mm}$,可得到含有 150 根条纹的干涉图。实际采集到的干涉图条纹数为 154,与设计值相符。

需要说明的是,干涉图中条纹数的最优值应当为 CCD 分辨率的 $1/4$ ^[19]。对于 $960\ \text{pixel} \times 960\ \text{pixel}$ 的 CCD,条纹数应为 240。因此在本系统基础上通过增加 l_1 并且改变点衍射板上针孔与透射窗之间的距离可进一步增加载频。



(a) 参考光斑下边沿与测试光斑下边沿相切

(a) Tangency between reference border and test nether border



(b) 参考光斑上边沿与测试光斑上边沿相切

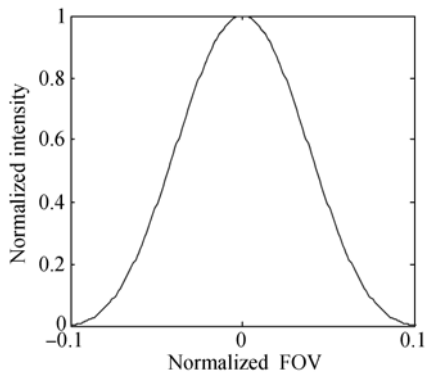
(b) Tangency between reference border and test upper border

图 6 参考光斑与测试光斑相对位置示意图

Fig. 6 Sketch maps for relative position between reference and test spots

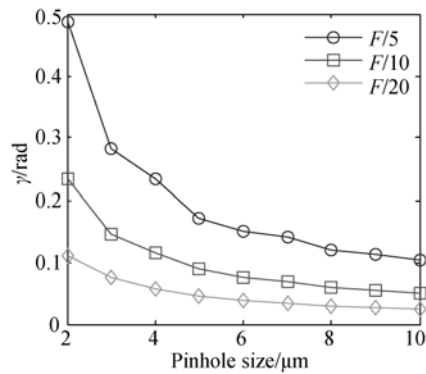
4.2 参考光覆盖范围的影响因素

严格来说波前检测系统为非完全共光路系统,参考光束也不是孔径角为 180° 的理想球面波,测试光束与参考光束的空间分离有可能导致参考光斑未能“覆盖”测试光斑。为了能够正常实现干涉测量,在光学结构参数的选择上需要使 CCD 靶面处的参考波面能够“覆盖”测试波面。



(a) 参考光斑的二维光强分布

(a) 2-D intensity distribution of reference



(b) 不同针孔孔径条件下的孔径角变化

(b) Variation of aperture angle with pinhole size at different F numbers

图 7 参考光孔径角仿真结果

Fig.7 Simulation results of reference's aperture angles

图 6(a)中参考光斑下边沿与测试光斑下边沿相切,图 6(b)中参考光斑上边沿与测试光斑上边沿相切,分别为参考光“覆盖”测试光的临界状态。图中 γ, β 分别为参考光与测试光孔径角的一半。参考光的孔径角与针孔孔径、测试光孔径角等因素有关,测试光孔径角与待测件工作 $F_{\#}$ 有关。 θ, α 分别为光栅衍射角与参考光出射波面与水平方向的夹角。若要参考光斑能够“覆盖”测试波面,选择参数时需要使得 CCD 靶面处的参考光斑与测试光斑的相对位置处于图 6(a)与图 6(b)所示的情况之间,此时应满足:

$$\begin{cases} 3 \tan \theta \geq \tan \beta - \tan \gamma \\ \tan \gamma \geq \tan \theta + \tan \beta \end{cases}, \quad (7)$$

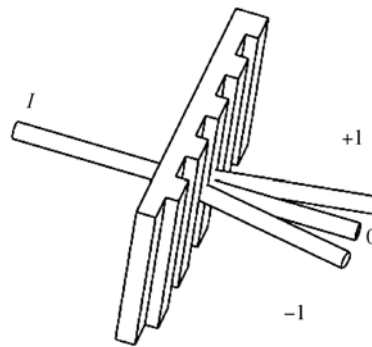
其中: $\tan \theta = \lambda / \Lambda, \tan \beta = 1 / 2 F_{\#}$ 。在 4.1 节已经确定了 λ, Λ 以及 $F_{\#}$, 本节需要确定参考光斑孔径角 γ 。

采用基尔霍夫衍射理论^[20] 仿真理想波面 ($\lambda = 532 \text{ nm}, F/10$) 经过针孔 (针孔孔径为 $6.5 \mu\text{m}$,

为理想艾里斑直径的一半^[1]) 衍射形成的参考光斑能量分布情况,如图 7(a)所示。图中的横坐标为视场(Field of View, FOV)归一化到考察屏与针孔之间的距离,定义参考光斑的有效口径为光强下降到最大光强的 $1/e^2$,则此时参考光束的 γ 约为 3.98° ,可以满足式(7)条件。图 7(b)是在不同 $F_{\#}$ 、不同针孔孔径条件下, γ 角的变化,可以看出在 $F_{\#}$ 一定的条件下, γ 角随针孔的增大而减小;在针孔孔径一定的条件下, γ 角随 $F_{\#}$ 的增大而减小。

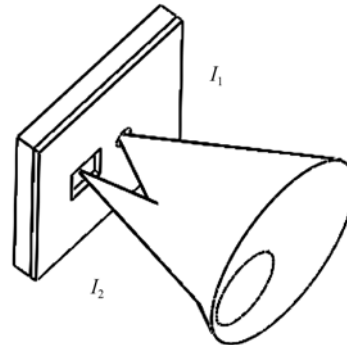
4.3 干涉图对比度的影响因素

为提升干涉图的对比度,这里使用位相光栅对参考光与测试光的光强实现再分配。根据式(5)可知影响干涉图对比度的因素有:光栅的 0 级衍射效率与 +1 级衍射效率、针孔孔径函数滤波后形成的参考光强衰弱情况。普通振幅型光栅的 0 级光衍射效率大于 +1 级, +1 级衍射光经过小孔衍射光能量进一步衰减,势必会降低干涉图的对比度,因此采用位相光栅为宜。方案中一维光栅与点衍射板分别如图 8(a)和 8(b)所示。



(a) 位相光栅衍射

(a) Diffraction of phase grating



(b) 点衍射板衍射

(b) Diffraction of point diffraction plate

图 8 位相光栅与点衍射板

Fig.8 Phase grating and point diffraction plate

一维光栅+1级衍射光入射到针孔发生衍射时光强为 $I_1 = c_{+1} \eta_p I$, 0级衍射光从透射窗透射而出, 光强为 $I_1 = c_0 I$, 其中 c_{+1}, c_0 分别为+1级、0级衍射光的衍射效率, η_p 为针孔衍射导致的能量衰减因子。当且仅当 $c_0/c_{+1} = \eta_p$ 时, 干涉图对比度有最大值。

若想获取高对比度的干涉图, 首先需要分析+1级衍射光通过小孔衍射后的能量衰减情况。利用基尔霍夫衍射理论可以仿真理想情况下艾里斑的能量分布情况, 如图 9(a) 所示^[20], 针孔孔径 d_3 变化导致的光能量衰减情况如图 9(b) 所示。由图可以看出, 在 $F_\#$ 一定的条件下参考光强角随针孔的减小而减小, 在针孔孔径一定的条件下参考光强角随 $F_\#$ 的增大而减小。实验中针孔孔径选择为理想艾里斑直径的一半就能满足测量精度要求^[1], 因此衍射光能量为光栅+1级衍射光能量的 59.1%。衰减因子除了与测试光 $F_\#$ 以及针孔孔径有关, 还与实际参与干涉的光覆盖范围有关。由于在实际测量中参考光形成的光斑仅有约 1/4 的范围覆盖测试光斑, 实际对干涉有贡献的参考光能量约为光栅+1级衍射光能量的 14.8%, 即能量衰减因子 $\eta_p \approx 14.8\%$ 。此时有 $c_{+1} \eta_p = c_0$, 结合光栅衍射效率公式^[21], 刻蚀深度应该满足:

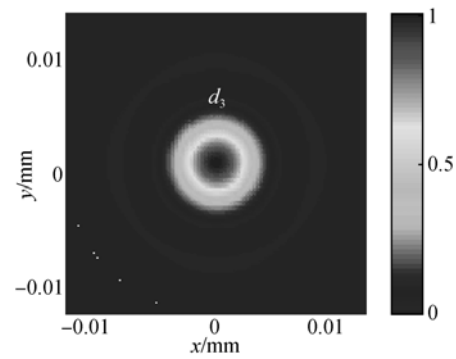
$$h = \frac{\lambda}{2\pi(n-1)} \cdot \cos^{-1} \left[1 - \frac{1}{\eta_p (1 - \cos 2\pi\kappa) / \pi^2 + 2\kappa(1 - \kappa)} \right], \quad (8)$$

式中: κ 为光栅的占空比。本文中 $\kappa = 1/2$, 根据式(8), 刻蚀深度 $h = 489 \text{ nm}$ (石英基底的折射率为 1.4607)。

由以上分析可知, 通过设计针孔孔径以及位相光栅的刻蚀深度可使干涉图对比度接近 1。使用普通振幅型光栅作为分光器件计算可得: 0级光衍射效率约为 25%, +1级光能量约为 10%^[20], 此时对比度约为 0.46。因此采用位相光栅所得到的对比度约为普通振幅型光栅的 2 倍, 而提升干涉图的对比度可以提升系统的抗噪声能力, 这对提升系统稳定性具有积极意义。

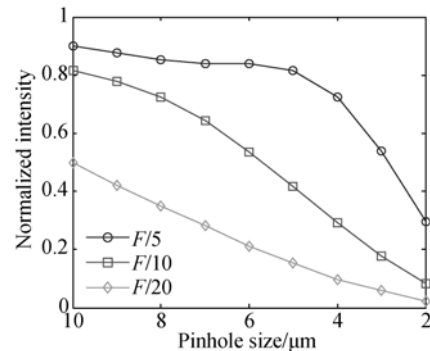
参考文献:

[1] DANIEL M. *Optical Shop Testing* [M]. 3rd Edition. New Jersey: Wiley-Interscience Press, 2007.



(a) 艾里斑能量分布

(a) Intensity distribution of Airy disk



(b) 针孔遮挡导致的能量衰减

(b) Energy attenuation due to pinhole cut

图 9 能量衰减效应

Fig. 9 Energy attenuation effect

5 结论

本文提出了一种基于光栅点衍射干涉原理的瞬态波前检测方法, 通过设计光栅参数与位置参数完成了干涉图的高线性载频加载, 使用光栅在干涉图中引入高线性载频, 实现了 $\Phi 400 \text{ mm}$ 瞬态波前的高精度测量。实验结果显示, 该方法得到的波面 RMS 值为 0.105λ , SID-4 波前探测器测得的波面 RMS 值为 0.101λ 。最后通过研究参考光通过针孔后的衍射角变化、能量衰减效应来设计位相光栅的刻蚀深度, 提升了干涉图的对比度, 进而提高了该检测系统的抗噪声能力和稳定性。

[2] 汤兆鑫, 黄玮, 许伟才, 等. 差分五棱镜扫描法在波前检测中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 1003-1011

TANG ZH X, HUANG W, XU W C, et al.. Application of differential pentaprism scanning in wave-

- front detection[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 1003-1011. (in Chinese)
- [3] 李宏壮,林旭东,刘欣悦,等. 400 mm 薄镜面主动光学实验系统[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2076-2083.
LI H ZH, LIN X D, LIU X Y, *et al.*. Experiment system of 400 mm thin-mirror active optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2076-2083. (in Chinese)
- [4] 卫沛锋,刘欣悦,林旭东,等. 自适应光学系统校正后实际分辨率评价指标[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 672-678.
WEI P F, LIU X Y, LIN X D, *et al.*. Evaluation index of the actual resolution after correction of adaptive optical system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 672-678. (in Chinese)
- [5] 许乔,顾元元,柴林,等. 大口径光学元件波前功率谱密度检测[J]. *光学学报*, 2001, 21(3): 344-347.
XU Q, GU Y Y, CHAI L, *et al.*. Measurement of wavefront power spectral density of large optical components [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(3): 344-347. (in Chinese)
- [6] 李鸿儒,冯国英,杜永兆,等. 基于窗口傅里叶变换剪切干涉法波前检测[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(8): 1897-1903.
LI H R, FENG G Y, DU Y ZH, *et al.*. Wavefront measurement based on windowed Fourier transform by use of radial shearing interferometer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8): 1897-1903. (in Chinese)
- [7] 刘蕾,曾爱军,朱玲琳,等. 可用于小口径光束波前检测的横向剪切干涉仪[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0108003.
LIU L, ZENG A J, ZHU L L, *et al.*. Lateral shearing interferometer for the wavefront test of small beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0108003. (in Chinese)
- [8] JEROME P, NICOLAS G. Extended Hartmann test based on the pseudo guiding property of a Hartmann mask completed by a phase chessboard [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(31): 5715-5720.
- [9] FUZHONG B, XIAOQIANG W, KAIZHENG H. Analysis of spatial resolution and pinhole size for single-shot point-diffraction interferometer using in closed-loop adaptive optics [J]. *Opt. Commun.*, 2013, 297: 27-31.
- [10] YONGZHAO D, GUOYING F, HONGRU L. Circular common-path point diffraction interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(19): 3927-3929.
- [11] MITSUO T, HIDEKI I, SEIJI K. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, 72(1): 156-160.
- [12] 吴亚琴,白福忠,刘珍,等. 环形共光路点衍射干涉仪[J]. *光学技术*, 2014, 40(5): 421-424.
WU Y Q, BAI F ZH, LIU ZH, *et al.*. Circular common-path point-diffraction interferometer [J]. *Optical Technique*, 2014, 40(5): 421-424. (in Chinese)
- [13] MEDECKI H, TEJNIL E, GOLDBERGE K A. Phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(19): 1526-1528.
- [14] 刘景峰,李艳秋,刘克. 移相式点衍射干涉仪的几个关键技术[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(4): 179-182.
LIU J F, LI Y Q, LIU K. Technical problems in phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(4): 179-182. (in Chinese)
- [15] 高芬,蒋庄德,李兵. 不同对准误差下的小孔衍射波面误差分析 [J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0812004.
GAO F, JIANG ZH D, LI B. Analysis of diffraction wavefront error caused by alignment error of pinhole [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0812004. (in Chinese)
- [16] 绍卫红,杨甬英,陈晓钰,等. 点衍射干涉系统光学结构参数优化研究[J]. *强激光与离子束*, 2014, 26(5): 051001.
SHAO W H, YANG Y Y, CHEN X Y, *et al.*. Optimization research on optical structural parameters of point diffraction interference system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5): 051001. (in Chinese)
- [17] 张敏,唐锋,王向朝,等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析 [J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308002.
ZHANG M, TANG F, WANG X CH, *et al.*. Phase retrieval errors analysis of interferogram using two dimensional fast fourier transform method [J]. *Chinese Laser*, 2013, 40(3): 0308002. (in Chinese)
- [18] 李俊峰,宋淑梅. 离轴抛物镜检测中调整误差对波前畸变的影响 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1763-1770.

- LI J F, SONG SH M. Influence of adjustment error on wavefront aberration in off-axis paraboloid test [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1763-1770. (in Chinese)
- [19] WILLIAM W M JR. Two-dimensional fringe-pattern analysis [J]. *App. Opt.*, 1983, 22(23): 3898-3901.
- [20] 马克思·波恩. 光学原理[M]. 第七版. 北京: 电子工业出版社, 2005.
MAX B. *Principle of Optics* [M]. 7th Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [21] 巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国. 矩形光栅衍射效率的一般表达式及其缺级现象[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(10): 1021-1024.
BAYANHEXIG, QI X D, TANG Y G. The general formula to the diffraction efficiency of rectangular grating and its phenomenon of missing orders [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(10): 1021-1024. (in Chinese)

作者简介:



李金鹏(1985—),男,江苏南京人,博士研究生,2009年于南京邮电大学获得学士学位,主要从事光干涉测量的研究。E-mail: Kingpenglee@163.com

导师简介:



陈磊(1964—),男,江苏南京人,研究员,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器方面的研究。E-mail: chenlei@njjust.edu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)