

基于圆载频干涉图相位解调技术的点衍射干涉术

李金鹏 陈磊 朱文华 胡芬

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 为测量光学系统出射波前以及动态波前,提出一种基于圆载频干涉图相位解调技术的点衍射干涉术。在传统点衍射干涉仪中调整点衍射板轴向离焦量引入圆载频,通过二阶极坐标变换可以将圆载频干涉图转换为具有准线性载频特征的干涉图,从而在频域中将连续频谱转换为准离散谱,采用傅里叶变换法即可提取相位。仿真波面为利用36项Zernike多项式随机生成,在离焦 17λ 条件下相位恢复误差的均方根值为 0.002λ 。实验测量了 $F/10$ 标准镜头出射波面,测量结果与SID-4波前探测器一致;实验还实现了有机玻璃材料吸收特性的动态检测。因此采用该技术能够实现光学系统的检测以及动态波面实时测量。

关键词 测量;光学测量;点衍射干涉术;圆载频;相位解调

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOA201535.0112001

Point Diffraction Interferometry Based on Phase Demodulation Technique for Circular Carrier Interferogram

Li Jinpeng Chen Lei Zhu Wenhua Hu Fen

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

Abstract In order to measure emerging wavefront and dynamic wavefront of optical system, a point diffraction interferometry based on technique for demodulating circular carrier interferogram is proposed. Circular carrier is introduced in interferogram by shifting point diffraction plate in longitudinal direction in conventional point diffraction interferometer. The circular carrier interferogram is converted into quasi linear carrier interferogram after quadratic polar coordinate transforming, meanwhile the continuous spectrum is converted into quasi discrete spectrum in frequency domain. Fourier transform method is then applied to extract phase. Simulated wavefront is generated randomly based on 36 Zernike polynomials, and root mean square value of phase recovery error is 0.002λ on condition that defocus is 17λ . Testing the emerging wavefront of $F/10$ lens is realized by using this method and the result is in agreement with that obtained by SID-4 wavefront sensor; dynamic measuring of organic glass absorptive character is also realized. This method can be applied to test optical system and measure real-time wavefront.

Key words measurement; optical testing; point diffraction interferometry; circular carrier; phase demodulation

OCIS codes 120.3180; 050.1960; 120.2650; 070.6110

1 引言

点衍射干涉术(PDI)是测量光学波前的有效手段,其共光路结构、无需参考镜等特点可以满足高精度测量要求。自从 Smartt 等^[1]提出点衍射干涉术测量原理,它就引起了众多学者的兴趣。Koliopoulos 等^[2]分析了

收稿日期: 2014-08-04;收到修改稿日期: 2014-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61108041、U1231111)

作者简介: 李金鹏(1985—),男,博士研究生,主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: kingpenglee@163.com

导师简介: 陈磊(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

E-mail: chenlei@mail.njust.edu.cn (通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

共光路型的红外点衍射干涉仪,认为该种干涉仪可以得到与Twyman Green干涉仪相似的高对比度条纹。由于点衍射干涉仪的共光路结构给分离测试光与参考光带来困难,很难在其中引入附加相位形成移相。国内外一些学者针对此点展开研究,提出了一系列移相式点衍射方案:Neal等^[3]提出基于电光晶体以及镀双折射膜点衍射板的偏振式点衍射干涉仪,通过改变电光晶体的电压实现移相;Paturzo等^[4]在铌酸锂晶体上沉积铝膜制作点衍射板,并利用其电光效应实现了点衍射干涉仪的移相;Gao等^[5]构建了一种基于双光栅的准共光路点衍射干涉结构,通过横向移动其中一个光栅实现移相;Wang等^[6-7]采用反射式点衍射板实现了参考光与测试光的分离,并利用压电陶瓷(PZT)实现移相,之后又分析了针孔尺寸带来的影响;Ramírez等^[8]制作了一种特殊的液态晶体波片点衍射板,通过对点衍射板加电压改变其延迟量实现移相;Bai等^[9]则采用多个棱镜分光实现了一种同步移相移相式点衍射干涉术。移相式点衍射干涉术系统复杂度较高,对点衍射板加工工艺要求较高,装调难度也相对较大,因此也有一些学者开始关注非移相式的点衍射干涉术:Du等^[10]构建了一种Circular common-path结构,得到线性载频的点衍射干涉图,并利用傅里叶变换法实现了相位测量;Park等^[11]仅采集单幅点衍射干涉图,采用迭代搜索策略实现了点衍射干涉图所包含相位的Zernike系数求解。

传统点衍射干涉仪中的点衍射板受到针孔横向尺寸的限制不便于横向离焦而引入线性载频,却易于实现轴向离焦而产生圆载频干涉图。鉴于点衍射干涉仪的特征,本文提出一种非移相式的基于圆载频干涉图相位解调技术的点衍射干涉术——圆载频点衍射干涉术(CCPDI)。在传统点衍射干涉系统基础上轴向移动点衍射板引入圆载频,通过圆载频相位解调法实现相位的恢复,并对影响该技术测量精度的因素作出讨论。

2 CCPDI原理

2.1 CCPDI理论描述

传统点衍射干涉原理如图1所示^[3]。待测波面会聚到点衍射板的小孔位置处,小孔范围内的光发生衍射产生的标准球面波作为参考波面,小孔外围的光从半透区域透射形成测试波面,由于衍射作用,参考波面的孔径角将大于测试波面,保证了光学系统能够被完全的检测到。

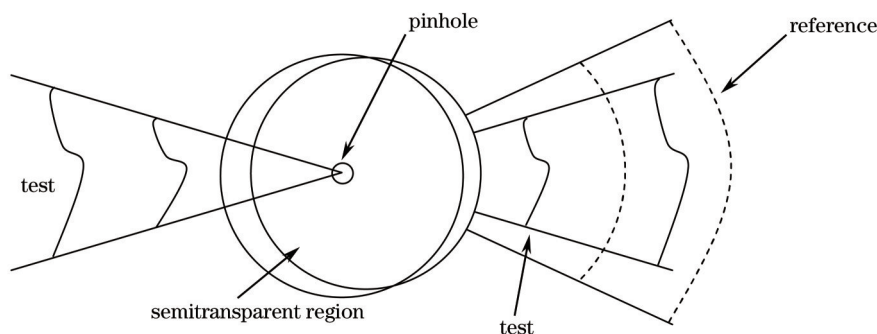


图1 点衍射干涉原理图

Fig.1 Principle of conventional PDI

离焦情况下点衍射干涉原理图如图2所示,待测件出射波面的复振幅分布可以表示为^[3]

$$U(x_1, y_1) = \text{circle}\left(\frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{d_1}\right) \exp[ikW(x_1, y_1)], \quad (1)$$

式中 d_1 为待测件出瞳孔径, W 为待测波面, $\text{circle}\{\}$ 表示圆域函数, k 为波矢。到达焦点处的光场分布可以表示为

$$U^*(x_2, y_2) = \mathcal{F}\{U(x_1, y_1)\}_{u = \frac{x_2}{\lambda f_1}, v = \frac{y_2}{\lambda f_1}}, \quad (2)$$

式中 $\mathcal{F}\{\}$ 表示作傅里叶变换, f_1 为待测件有效焦距, λ 为波长。设点衍射板的离焦量为 Δl , 根据傅里叶光学原理,点衍射板前端的复振幅分布 $U^-(x'_2, y'_2)$ 与焦点处复振幅分布 $U^*(x_2, y_2)$ 有如下关系:

$$\mathcal{F}\{U^-(x'_2, y'_2)\}_{u' = \frac{x_2}{\lambda f_2}, v' = \frac{y_2}{\lambda f_2}} = \mathcal{F}\{U^*(x_2, y_2)\}_{u = \frac{x_2}{\lambda f_2}, v = \frac{y_2}{\lambda f_2}} \exp[-i\pi\lambda\Delta l(u'^2 + v'^2)], \quad (3)$$

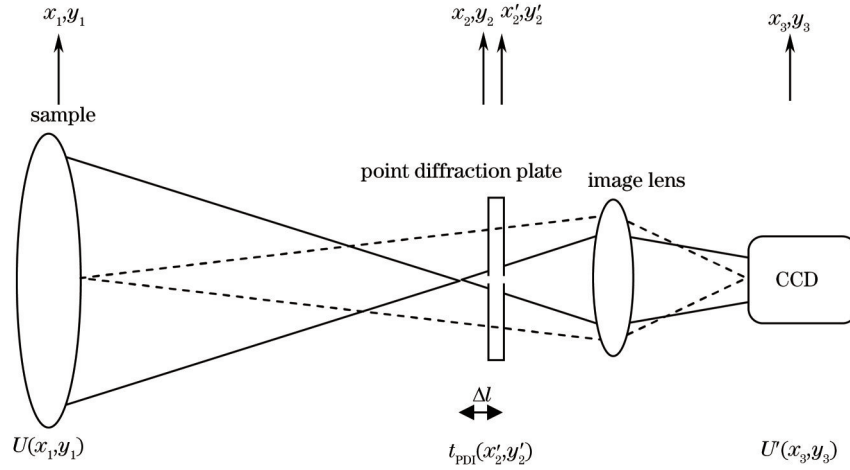


图2 圆载频点衍射干涉原理

Fig.2 Principle of circular carrier point diffraction interferometry

式中 f_2 为成像镜头焦距,将(2)式代入(3)式,根据傅里叶变换性质并忽略常数项的影响,有

$$\mathcal{F}\left\{U^-(x'_2, y'_2)\right\}_{u'=\frac{x_3}{\lambda f_2}, v'=\frac{y_3}{\lambda f_2}} = U(x_3, y_3) \exp\left[-i\pi\lambda\Delta l(u'^2 + v'^2)\right]_{u'=\frac{x_3}{\lambda f_2}, v'=\frac{y_3}{\lambda f_2}} \quad (4)$$

点衍射板透射率函数表示为

$$\tau_{\text{PDI}} = t_{\text{plate}} + (1 - t_{\text{plate}}) \text{circle}\left(\frac{\sqrt{x_2'^2 + y_2'^2}}{d_2}\right), \quad (5)$$

式中 t_{plate} 为点衍射板镀膜区域的透射率, d_2 为针孔孔径。从点衍射板透射而出的光场分布 $U^+(x'_2, y'_2)$ 为

$$U^+(x'_2, y'_2) = \tau_{\text{PDI}} \cdot U^-(x'_2, y'_2). \quad (6)$$

若待测件距离成像透镜足够远,此时待测件将成像在成像透镜后焦面附近,成像镜头起到傅里叶变换透镜的作用。忽略常数项并将点衍射板置于成像透镜前焦面处,则 CCD 靶面处的复振幅分布为

$$U'(x_3, y_3) = \mathcal{F}\left\{U^+(x'_2, y'_2)\right\}_{u'=\frac{x_3}{\lambda f_2}, v'=\frac{y_3}{\lambda f_2}} = T_{\text{PDI}}(x_3, y_3) \otimes \mathcal{F}\left\{U^-(x'_2, y'_2)\right\}_{u'=\frac{x_3}{\lambda f_2}, v'=\frac{y_3}{\lambda f_2}}, \quad (7)$$

式中 T_{PDI} 为透射率函数 τ_{PDI} 的傅里叶变换, \otimes 代表卷积运算。结合(4)、(7)式可以看出 CCD 靶面处的光场分布仅与待测件出瞳位置处的光场分布 U 、点衍射板透射率函数以及相位延迟因子 $\exp\left[-i\pi\lambda\Delta l(u'^2 + v'^2)\right]_{u'=\frac{x_3}{\lambda f_2}, v'=\frac{y_3}{\lambda f_2}}$ 有关。将(1)、(4)式代入(7)式,进一步推导并忽略常数项可以得到

$$U'(x_3, y_3) = t_{\text{plate}} \text{circle}\left(\frac{\sqrt{x_3^2 + y_3^2}}{d_1}\right) \exp[ikW(x_3, y_3)] \exp\left[-i\pi\lambda\Delta l(x_3^2 + y_3^2)/(\lambda^2 f_2^2)\right] + (1 - t_{\text{plate}}) \frac{d_2^2 k}{8f_1} \times \frac{2J_1\left\{(kd_2/2f_1)\sqrt{x_3^2 + y_3^2}\right\}}{(kd_2/2f_1)\sqrt{x_3^2 + y_3^2}} \otimes \left\{ \text{circle}\left(\frac{\sqrt{x_3^2 + y_3^2}}{d_1}\right) \exp[ikW(x_3, y_3)] \exp\left[-i\pi\lambda\Delta l(x_3^2 + y_3^2)/(\lambda^2 f_2^2)\right] \right\}, \quad (8)$$

式中 $J_1\{\}$ 表示一阶贝塞尔函数。

由(8)式可以看出在 CCD 靶面处的光场复振幅分布由原始待测波面(等式右边第一项)与参考波面(等式右边第二项)构成,其中参考波面分布取决于携带相位延迟因子的测试波面复振幅分布与小孔孔径函数傅里叶变换的卷积结果。由于在待测相位中引入了离焦相位,因此将得到圆载频干涉图。

2.2 相位解调原理

针对圆载频干涉图,采用二阶极坐标变换的方法求解待测相位。依据(8)式笛卡尔坐标系下的干涉图为圆载频干涉图,其干涉图光强公式可以表示为

$$I(x_3, y_3) = I_1(x_3, y_3) + I_2(x_3, y_3) + 2\sqrt{I_1(x_3, y_3)I_2(x_3, y_3)}\cos[kW(x_3, y_3) + c(x_3^2 + y_3^2)], \quad (9)$$

式中 I_1 、 I_2 分别为参考光强与测试光强, $c = -\pi\Delta l/(\lambda f_2^2)$ 为离焦系数。若以圆载频条纹的中心为坐标原点, 二阶极坐标变换可由下式表示:

$$\begin{cases} x_3 = \sqrt{R} \cos \theta \\ y_3 = \sqrt{R} \sin \theta \end{cases} \quad (10)$$

式中 $R = x_3^2 + y_3^2$ 。结合(9)、(10)式可得二阶极坐标系 $R-\theta$ 下的干涉光强分布为

$$I'(\theta, R) = I'_1(\theta, R) + I'_2(\theta, R) + 2\sqrt{I'_1(\theta, R)I'_2(\theta, R)}\cos[kW'(\theta, R) + cR], \quad (11)$$

式中 I'_1 、 I'_2 和 W' 分别为 $R-\theta$ 坐标系下的参考光强、测试光强和待测波面。由(11)式可知在 $R-\theta$ 空间中干涉图为线性载频条纹, 利用欧拉公式(11)式可以写成

$$I'(\theta, R) = I'_1(\theta, R) + I'_2(\theta, R) + \psi(\theta, R)\exp(icR) + \psi^*(\theta, R)\exp(-icR), \quad (12)$$

式中 $\psi(\theta, R) = \sqrt{I'_1(\theta, R)I'_2(\theta, R)}\exp[ikW'(\theta, R)]$, $\psi^*(\theta, R)$ 为其共轭。对(12)式作傅里叶变换可得

$$F_i(f_\theta, f_R) = F_{I'_1}(f_\theta, f_R) + F_{I'_2}(f_\theta, f_R) + \Phi\left(f_\theta, f_R - \frac{c}{2\pi}\right) + \Phi^*\left(f_\theta, f_R + \frac{c}{2\pi}\right), \quad (13)$$

式中 $F_{I'_1}$ 、 $F_{I'_2}$ 、 Φ 分别为 I'_1 、 I'_2 、 ψ 的傅里叶变换, f_θ 和 f_R 分别为 θ 和 R 的空间频率。使用滤波器选出相位谱 $\Phi\left(f_\theta, f_R - \frac{c}{2\pi}\right)$ 并作逆傅里叶变换, 可以得到 $\psi(\theta, R)\exp(icR)$, 此时包含 R 方向载频的待测相位可以表示为

$$kW'(\theta, R) + cR = \arctan \frac{\text{Im}\{\psi(\theta, R)\exp(icR)\}}{\text{Re}\{\psi(\theta, R)\exp(icR)\}}, \quad (14)$$

式中 $\text{Im}\{\}$ 与 $\text{Re}\{\}$ 分别为取虚部与取实部运算。在对相位作解包裹运算并消除 R 方向载频项之后可以得到 $R-\theta$ 空间下待测波面 $W'(\theta, R)$ 。通过坐标逆变换可以得到笛卡尔坐标系下的原始波面分布 $W(x_3, y_3)$ 。

3 数值仿真分析与实验验证

3.1 数值仿真分析

本节将验证 2.2 节中描述的二阶极坐标变换方法的正确性。利用 36 项 Zernike 多项式随机生成待测波前, 并将其作为用以验证算法的标准波面, 如图 3(a) 所示, 其峰谷值(PV)为 0.505λ , 均方根值(RMS)为 0.116λ 。在待测波面中引入 17λ 的离焦项构造的笛卡尔坐标系下的圆载频干涉图, 如图 3(b) 所示, 其光强满足(9)式, 图像尺寸为 $401 \text{ pixel} \times 401 \text{ pixel}$ 。

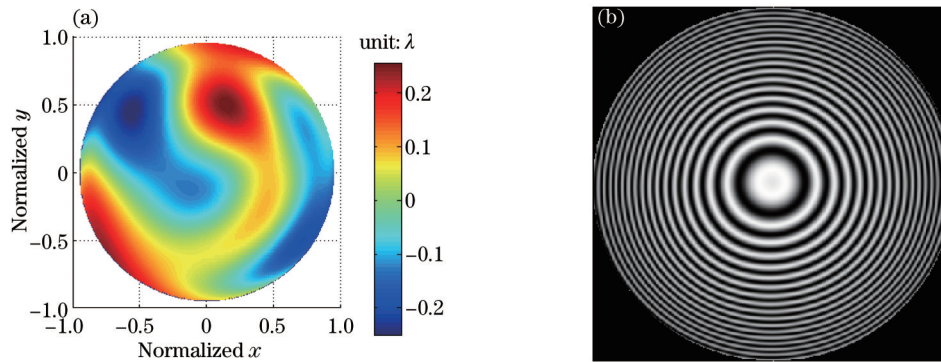


图3 (a)标准波面;(b)仿真圆载频干涉图

Fig.3 (a) Standard wavefront; (b) simulated circular carrier interferogram

根据(10)式对图 3(b) 所示圆载频干涉图作二阶极坐标变换, 可以得到二阶极坐标系 $R-\theta$ 下准线性载频干涉图如图 4(a) 所示, 其光强变化分布满足(11)式, R 方向与 θ 方向的图像尺寸分别为 200 pixel 和 401 pixel 。对图 4(a) 所示的线性载频条纹图作傅里叶变换得到满足(13)式的频谱。图 4(b) 为当 $f_\theta=0$ 时 f_R 方向上的频谱幅值变化分布, 可以看出 $R-\theta$ 下干涉图的频谱为准离散谱。

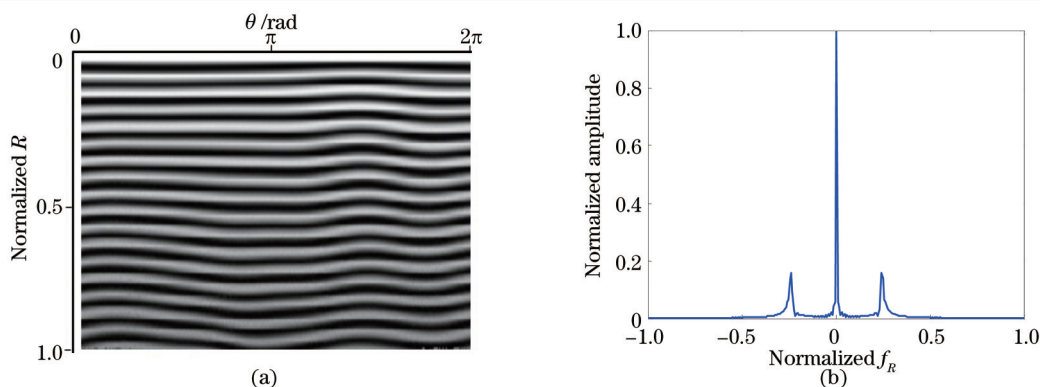


图4 $R-\theta$ 空间中的(a)干涉条纹以及(b)频谱

Fig.4 (a) Fringe pattern in $R-\theta$ space and (b) its spectrum

将包含相位信息的+1级旁瓣滤出的作逆傅里叶变换并采用(14)式解调相位,消去载频项得到 $R-\theta$ 空间下的相位分布。作坐标逆变换得到笛卡尔坐标系下的待测相位,其相位解调结果如图5(a)所示,PV值为 0.504λ ,RMS值为 0.116λ 。误差分布如图5(b)所示,PV值为 0.0204λ ,RMS值为 0.002λ 。因此采用该圆载频相位恢复算法能够精确恢复相位。

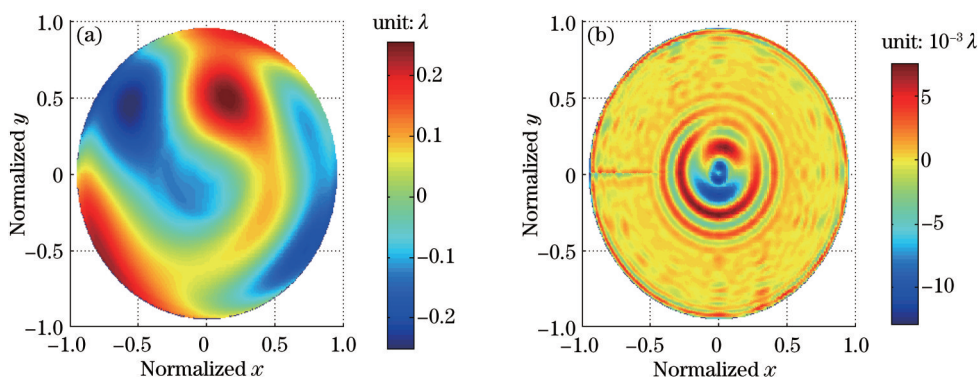


图5 (a)波面解调结果和(b)误差分布

Fig.5 (a) Demodulation result of wave surface and (b) error distribution

3.2 标准镜头检测

实验装置示意图如图6所示,被测件是 $\Phi 100\text{ mm}$ 、 $F=10$ 的干涉仪标准镜头,该镜头的出射波面质量将直接影响干涉仪的测量精度。点衍射板的小孔孔径为 $10\text{ }\mu\text{m}$,采用ZYGO干涉仪出射波面作为测量该镜头的入射波面,中心波长为 632.8 nm 。被测波面会聚到点衍射板上,轴向离焦点衍射板得到的圆载频点衍射干涉图如图7(a)所示,干涉图中包含的离焦达 17λ ,采用二阶极坐标求解到的出射波面如图7(b)所示。四波剪切干涉仪(SID-4)是Phasics公司生产的波前测量传感器,利用四波剪切干涉仪测量同一个被测件的出射波前,其结果如图7(c)所示。与SID-4相比,CCPDI具有较高的分辨率。

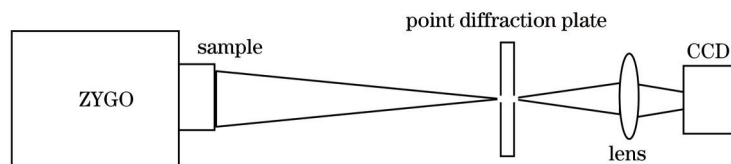


图6 $F/10$ 镜头检测实验装置图

Fig.6 Experimental installation for $F/10$ lens testing

利用CCPDI法测量该镜头的出射波面,恢复得到的波面PV值为 0.579λ ,RMS值为 0.130λ ;利用SID-4测量得到的波面,其PV值为 0.571λ ,RMS值为 0.126λ 。所得波面的差值如图7(d)所示,其PV值为 0.138λ ,RMS值 0.0202λ 。根据实验结果可知,CCPDI法测量得到的结果与SID-4测量的结果一致。

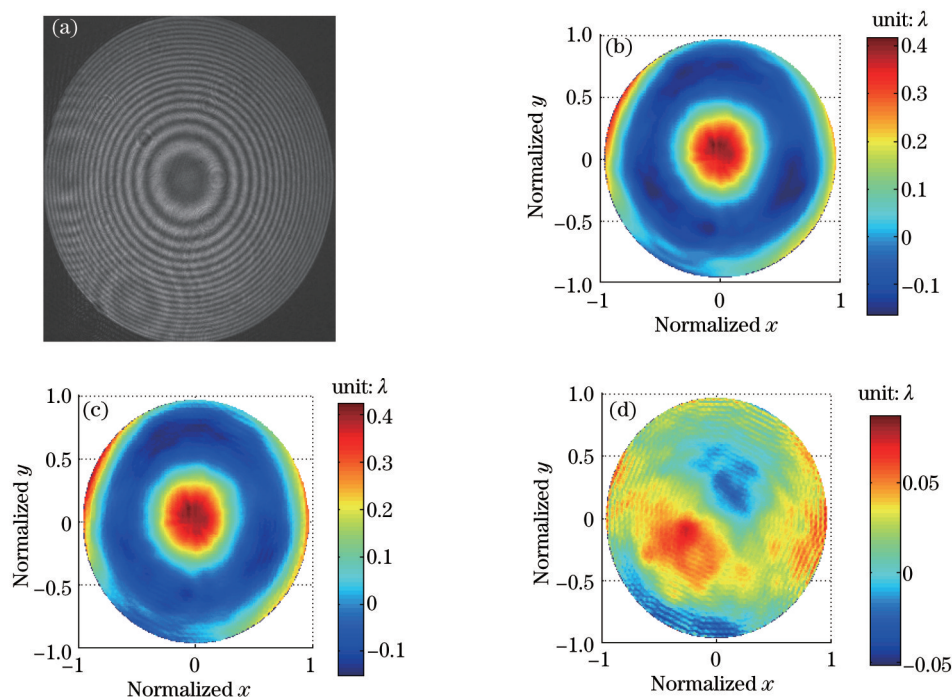


图7 $F/10$ 镜头检测实验结果。(a)圆载频点衍射干涉图;(b) CCPDI法测得波面;(c)SID-4测得波面;(d)波面差值
 Fig.7 Results for $F/10$ lens testing. (a) Circular carrier point diffraction interferogram; (b) wavefront derived by CCPDI; (c) wavefront derived by SID-4; (d) wavefront difference

3.3 有机玻璃吸收特性的动态检测

实验装置示意图如图8所示。被测样品为有机玻璃,激励源为高功率激光器,当激励源正入射到待测样品表面,待测样品吸收能量将引起表面面形发生变化,该面形变化随时间变化而变化,即为动态过程。利用圆载频点衍射干涉术可以实时检测有机玻璃面形变化的动态过程。中心波长为 532 nm 的激光经过扩束系统入射到被测样品,由被测件反射到透镜上,再由透镜会聚到点衍射板上,轴向离焦点衍射板引入圆载频,连续采集到的点衍射干涉图如图9所示。图9中虚线框内为高功率激光器照射区域。

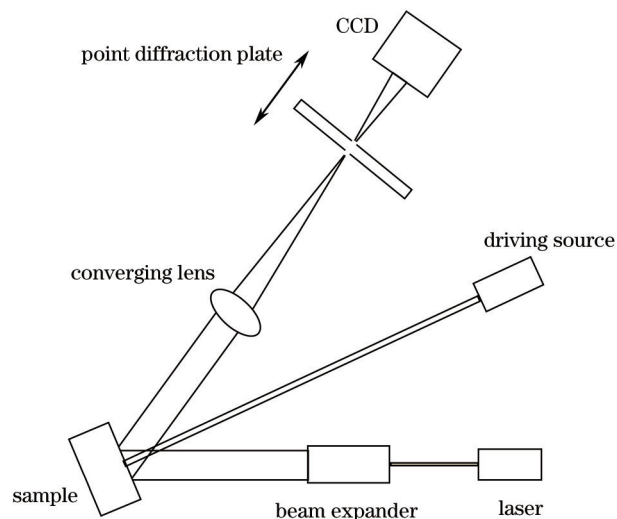


图8 有机玻璃吸收特性检测实验装置示意图

Fig.8 Schematic of experimental installation for organic glass absorption character testing

利用二阶极坐标变换法解调采集到的干涉图,认为材料在 $t=0$ 的时刻有机玻璃未吸收光能量,将解调相位减去 $t=0$ 时刻的相位分布可以得到各时刻样品吸收光能量后引入的面形变化,如图10所示。由结果可知

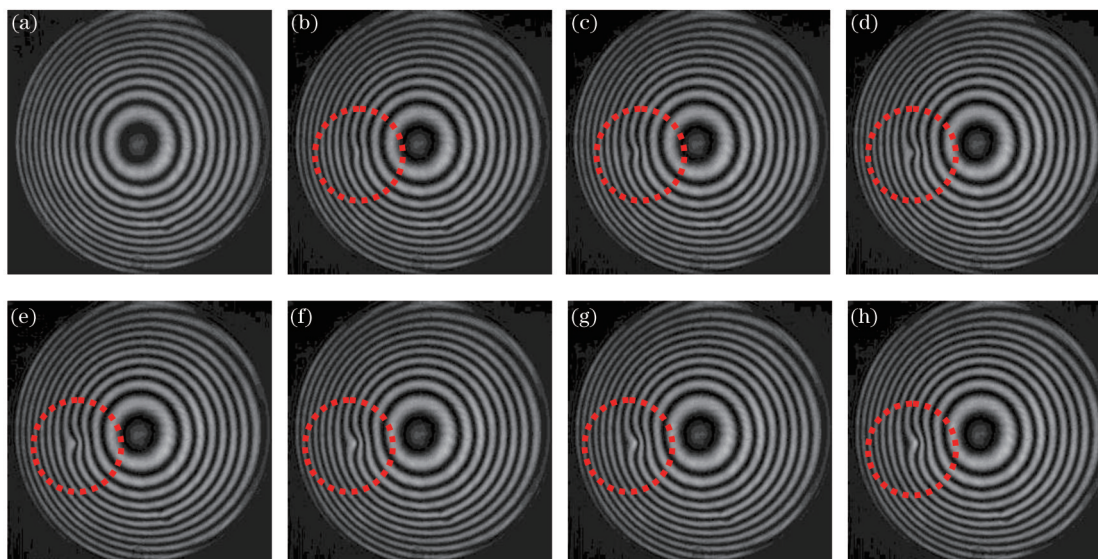


图9 有机玻璃吸收特性检测实验采集到的干涉图。(a) $t=0$; (b) $t=0.35$ s; (c) $t=0.7$ s; (d) $t=1.05$ s; (e) $t=1.4$ s; (f) $t=1.75$ s; (g) $t=2.15$ s; (h) $t=2.45$ s

Fig.9 Acquired interferograms in the experiments of testing organic glass absorption character. (a) $t=0$; (b) $t=0.35$ s; (c) $t=0.7$ s; (d) $t=1.05$ s; (e) $t=1.4$ s; (f) $t=1.75$ s; (g) $t=2.15$ s; (h) $t=2.45$ s

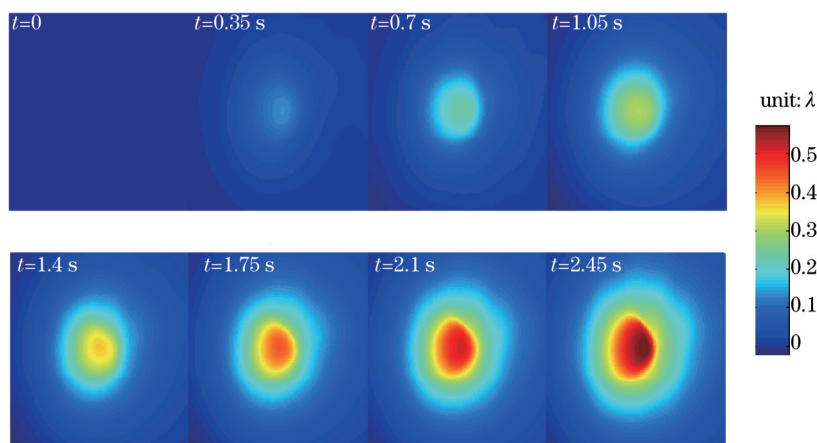


图 10 有机玻璃面形变化测量结果

Fig.10 Measurement results for surface change of organic glass

在 2.45 s 时间段内,材料的面形变化随着吸收光能量的增大而增大,当光照时间为 2.45 s 时面形变化 PV 值达到 0.58λ , RMS 值为 0.115λ 。

该部分通过仿真以及实验证实了 CCPDI 的正确性。仿真结果显示 CCPDI 的波前恢复偏差 RMS 值达到 0.002λ ; 通过实验证实了 CCPDI 不仅实现普通点衍射干涉术能实现的光学系统静态波前测试,而且能够实现时域移相式点衍射干涉术难以实现的动态波面实时测量。

4 讨 论

标准镜头检测的精度依赖于点衍射板参考波前质量以及相位恢复算法精度,即其精度受系统误差限制。有机玻璃吸收特性的动态检测聚焦于动态波前的变化,系统误差影响不大。因此以下讨论均以标准镜头检测实验为讨论背景。

4.1 参考波面误差

参考波面误差是指参考波面与理想球面波的偏差,与小孔实际形状、大小有关。马强等^[12-13]考虑了当点衍射板放置在被测透镜焦点位置时,小孔尺寸、小孔加工装调误差与参考波面质量的关系,Neal 等^[1]研究了

入射光携带各种波像差时参考波前的质量。本节利用菲涅耳衍射理论讨论不同离焦量、不同小孔口径条件下参考波前的质量。采用衍射波面与理想球面波之差的RMS值(ERMS)表征衍射波面的质量,其结果如图11所示。

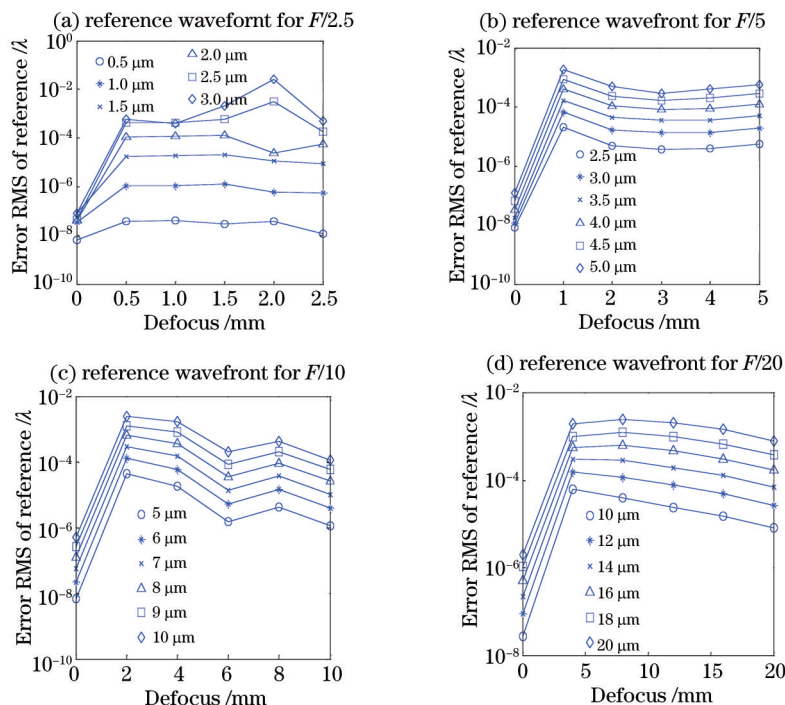


图 11 衍射波面质量

Fig.11 Diffraction wavefront quality

小孔孔径在理想波面艾里斑半径附近取值,其中波长为632.8 nm。由结果可知当离焦量一定时,波面质量随着小孔孔径增大而变差;当小孔孔径一定时,波面质量与离焦量不存在单调性的变化关系,这是因为当离焦量为0时,即针孔放置在光束的会聚点处,该处针孔范围内的波面上各个子波前具有相同的相位,接近点光源的特性,衍射出来的波面质量最好;然而离焦量增大后针孔处的子波前呈现离焦相位分布形式,此时不能再看作点光源,衍射波前会变差;但是离焦量进一步增大时,针孔范围内的子波前分布相位差异进一步减小,又接近点光源的特性,衍射波面的质量变好。

综合以上结果可知,CCPDI可以在测量不同数值孔径的光束,采用离焦的方式引入圆载频时,衍射波前偏差RMS值在 $10^{-2}\lambda \sim 10^{-8}\lambda$ 变化,虽然离焦后得到的衍射波面质量可能达到 $10^{-2}\lambda$,但是可以采取进一步增大离焦量来满足测量精度要求。实验中圆载频干涉图是在10 μm针孔,引入约为6 mm的离焦量情况下采集到的,其衍射波前质量达到 $2 \times 10^{-4}\lambda$,可以满足精度要求。

4.2 离焦量对相位解调精度的影响

在对圆载频干涉图作二阶极坐标变换后应采用傅里叶变换相位解调法恢复相位,然而傅里叶变换相位解调法的适用条件为条纹满足单调性条件,即

$$c > \left(\frac{\partial k W'}{\partial R} \right)_{\max} \quad \text{or} \quad c < - \left(\frac{\partial k W'}{\partial R} \right)_{\max}, \quad (15)$$

转换到笛卡尔坐标系下点衍射板的离焦量 Δl 需要满足

$$\Delta l > 2f_2^2 \left[\frac{\partial W}{\partial (x^2 + y^2)} \right]_{\max} \quad \text{or} \quad \Delta l < 2f_2^2 \left[\frac{\partial W}{\partial (x^2 + y^2)} \right]_{\max}. \quad (16)$$

在其他条件与仿真一致情况下对离焦量取值进行分析,相位解调结果的误差RMS值如表1所示。

由讨论可知,若要正确解调相位离焦量需满足(16)式。由表1可知,当在干涉图中引入的离焦量增大时,

相位解调精度随着离焦量增大而增大,这是因为离焦增大将使得在 $R-\theta$ 空间中的线性载频干涉图载频加大,使得频谱中信号谱与背景谱以及边沿效应产生的泄露频谱相对分开^[4],频率交叠对相位恢复的影响会减小;当离焦量大于 13λ ,频率交叠的影响可以忽略不计。

表 1 圆载频干涉图中离焦量取值与相位恢复误差均方根值的关系

Table 1 Relationship between the defocusing in the circular carrier interferogram and the error RMS value in the phase demodulation

Defocus / λ	5	7	9	11	13	15	17	19
ERMS / λ	0.0039	0.0035	0.0028	0.0027	0.0021	0.0019	0.0020	0.0020

5 结 论

研究了一种在传统点衍射干涉仪上可实现的干涉测量技术——圆载频点衍射干涉术。圆载频点衍射干涉术利用点衍射干涉仪易于轴向离焦的特点实现了标准镜头检测以及有机玻璃材料吸收特性动态检测实验中的圆载频条纹加载,并且采用二阶极坐标变换法正确提取相位,实现了相位的高精度解调。

参 考 文 献

- 1 R N Smartt, J Strong. Point-diffraction interferometer [J]. J Opt Soc Am, 1972, 62: 726-735.
- 2 C Koliopoulos, O Kwon, R Shagam, *et al.*. Infrared point-diffraction interferometer [J]. Opt Lett, 1978, 3(3): 118-120.
- 3 Robert M Neal, James C Wyant. Polarization phase-shifting point-diffraction interferometer [J]. Appl Opt, 2006, 45(15): 3463-3476.
- 4 M Paturzo, F Pignatiello, S Grilli. Phase-shifting point-diffraction interferometer developed by using the electro-optic effect in ferroelectric crystals [J]. Opt Lett, 2006, 31(24): 3597-3599.
- 5 Peng Gao, Irina Harder, Vanusch Nercissian, *et al.*. Phase-shifting point-diffraction interferometry with common-path and in-line configuration for microscopy [J]. Opt Lett, 2010, 35(5): 712-714.
- 6 Daodang Wang, Fumin Wang, Yongying Yang. Modified polarization point diffraction interferometer with extended measurable NA for spherical surface testing [J]. Optik, 2013, 124(22): 5481-5485.
- 7 Daodang Wang, Fumin Wang, Hui Zou. Analysis of diffraction wavefront in visible-light point-diffraction interferometer [J]. Appl Opt, 2013, 52(31): 7602-7608.
- 8 Claudio Ramírez, Eva Otón, Claudio Iemmi. Point diffraction interferometer with a liquid crystal monopixel [J]. Opt Express, 2013, 21(7): 8116-8125.
- 9 Fuzhong Bai, Xiaoqiang Wang, Kaizheng Huang. 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 Du, Guoying Feng, Hongru Li. Circular common-path point diffraction interferometer [J]. Opt Express, 2012, 37(19): 3927-3929.
- 11 Ryeojin Park, Dae Wook Kim, Harrison H Barrett. Synthetic phase-shifting for optical testing: Point-diffraction interferometry without null optics or phase shifters [J]. Opt Express, 2013, 21(22): 26398-26417.
- 12 Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo, *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12): 2321-2324.
马 强, 刘伟奇, 李香波, 等. 点衍射干涉仪中小孔衍射波面误差分析[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2321-2324.
- 13 Lu Zengxiang, Jin Chunshui, Ma Dongmei, *et al.*. Analysis of effect of tiny pinhole deviation on far-field wave front quality [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812002.
卢增雄, 金春水, 马冬梅, 等. 微小孔偏差对远场波前质量影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812002.
- 14 Daniel Malacara. Optical Shop Testing, 3rd Edition [M]. New Jersey: Wiley-Interscience Press, 2007.

栏目编辑: 史 敏