

针孔式点衍射干涉仪的无镜成像方法

黄磊¹, 高志山¹, 杨忠明¹, 窦沂蒙¹, 窦建泰¹, 朱文华¹, 左超^{1,2}, 袁群^{1*}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094

摘要 为了避免传统针孔式点衍射干涉仪中干涉成像系统所带来的误差, 提出一种无镜成像算法, 无需干涉成像系统, 从 CCD 直接采集得到的干涉图复原求解被测件面形。基于平面波角谱理论构建虚拟物像共轭关系, 由 CCD 处直接采集到的干涉图反演至被测件共轭位置的干涉图。仿真与实验结果表明, 提出的无镜成像算法可以有效消除干涉图边缘衍射和中心衍射条纹, 同时抑制相干噪声。采用无镜成像方法可以避开干涉成像系统的设计与加工难度, 有效地保证针孔式点衍射干涉仪的测量准确度。

关键词 测量; 干涉成像系统; 相干噪声; 无镜成像算法; 虚拟透镜; 平面波角谱理论

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0312002

Lensless Imaging Method for Pinhole Type Point Diffraction Interferometer

Huang Lei¹, Gao Zhishan¹, Yang Zhongming¹, Dou Yimeng¹, Dou Jiantai¹,
Zhu Wenhua¹, Zuo Chao^{1,2}, Yuan Qun¹

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and
Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

² Jiangsu Provincial Key Laboratory of Spectral Imaging & Intelligent Sense, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract In order to avoid the error introduced by the imaging system in traditional pinhole type point diffraction interferometer, a lensless imaging algorithm is proposed. The algorithm can retrieve the phase of the interferograms captured by CCD without the imaging system. On the basis of the plane wave spectrum theory, we can obtain the interferogram of the exit pupil conjugate location by constructing a virtual imaging conjugate relation. Simulation and experimental results show that the proposed lensless imaging algorithm can remove the edge diffraction fringes and the central diffraction effects in the interferogram, and the coherent noise can be eliminated as well. With this lensless imaging method, we can remove the interference imaging system in the pinhole type point diffraction interferometer which is difficult to design and fabricate. Besides, this algorithm can also effectively guarantee the high accuracy of pinhole type point diffraction interferometer.

Key words measurement; interference imaging system; coherent noise; lensless imaging algorithm; virtual lens; plane wave angular spectrum theory

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 120.5050; 050.1960

收稿日期: 2016-09-12; **收到修改稿日期:** 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(61377015, 61505080)、江苏省自然科学基金(BK20150788)、江苏省光谱成像与智能感知重点实验室开放基金(3091601410402)

作者简介: 黄磊(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事点衍射干涉测量方面的研究。E-mail: 1179848687@qq.com

导师简介: 高志山(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事精密光学测试技术、光学设计方面的研究。

E-mail: zhishgao@njust.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: yuanqun@njust.edu.cn

1 引 言

针孔式点衍射干涉仪利用针孔衍射的理想球面波作为参考波面,具有常规商用斐索干涉仪不可比拟的优势,测量准确度可达到亚纳米量级^[1]。干涉成像是针孔式点衍射干涉仪的重要组成部分,为被测件与 CCD 接收面提供共轭成像关系。为了保证点衍射干涉仪亚纳米级的测量准确度,对干涉成像系统的设计、加工与装调都提出了极高的要求。首先,干涉成像系统要求有极低的相干噪声,要求材料的杂质、麻点、划痕以及表面光洁度等都得到较好的控制。其次,干涉成像系统的畸变控制要求严格,对于大相对孔径的被测件,其设计难度大,装调误差控制极其苛刻。上述要求不仅增加了干涉成像系统的制造成本,且不可避免地引入了误差(相干噪声等)。因此,在针孔式点衍射干涉仪中去除干涉成像系统,研究无镜成像技术是解决成像系统这一难点的一个重要途径。

无镜成像技术,即去除点衍射干涉仪中的成像系统,使测试光束和参考光束不再经过成像系统而是直接投射在 CCD 靶面上的技术。被测件表面与 CCD 靶面不再是共轭成像关系而是衍射成像关系,因此在 CCD 上接收的干涉图会带有衍射环,应首先去除其衍射效应,恢复被测件位置(或其共轭位置)的干涉图,然后利用干涉图获得被测件面形信息。

1999 年,美国 Lawrence Livermore 国家实验室提出光纤点衍射方案,用于极紫外光刻及激光核聚变装置中的球面和非球面面形测量。为达到亚纳米级别的测量精度,Sommargren 等^[2]提出了无镜成像技术,这一技术避免了成像透镜的制造,同时能够实现非球面的高精度测量,但对无镜成像算法未做详细报道。目前,美国 Lawrence Livermore 国家实验室、日本大阪大学^[3]、俄罗斯微观结构研究所^[4]以及佳能公司^[5]均对无镜成像技术做了深入的研究,并且已经把该项技术运用到实际检测中,但对该关键技术未做详细报道。2016 年,中国计量大学徐杨波等^[6]提出在无镜成像方式下基于三坐标重构和对称偏移补偿的点衍射波前校正方法。同年,南京理工大学 Zhu 等^[7]提出了无镜反射式点衍射干涉仪算法(LRPDI)用于动态点衍射波前测量。

针孔式点衍射干涉仪中经针孔衍射的波面为球面波,现有针孔式点衍射干涉仪的相关研究都是以球面波衍射理论作为基础进行的^[8-9]。球面波衍射理论包括基尔霍夫理论和瑞利-索末菲衍射理论^[10]。为了避免球面波衍射理论中复杂的球面衍射因子以及衍射过程中引入的采样问题^[11],本文通过构建虚拟物像共轭关系将针孔式点衍射干涉仪中的球面波转换为平面波进行分析。分析了针孔式点衍射干涉实验装置的距离误差判断量级,讨论了无镜成像算法的精度。

2 无镜成像理论

针孔式点衍射干涉仪的结构如图 1 所示,在此基础上去除干涉成像系统,搭建无镜成像实验装置。光束经过显微物镜聚焦后由针孔衍射产生标准球面波,一部分经被测件反射作为测试光,测试光在被测件边缘发生出瞳衍射^[12],会聚于针孔,与同样从针孔处衍射的另一部分球面波,即参考光发生干涉,直接进入 CCD,形成干涉图。

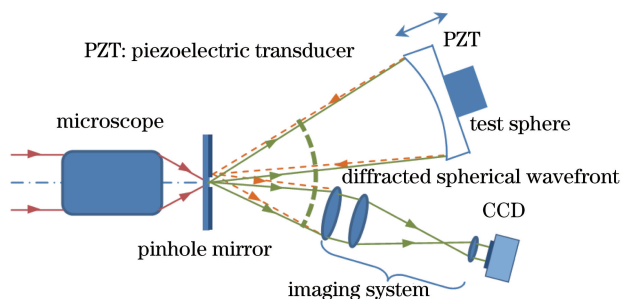


图 1 针孔式点衍射干涉仪检测光学球面元件的面形光路示意图

Fig. 1 Light path diagram of pinhole type point diffraction interferometer for testing spherical forms

为了实现无镜成像,假设在 CCD 靶面处放置一个孔径无穷大(避免出瞳衍射)的虚拟透镜^[13],如图 2 所示,设置透镜焦点位置与被测件的曲率中心重合;将 CCD 靶面处接收的球面波通过该透镜准直,传播到基于

虚拟透镜与被测件共轭的虚拟像面位置。虚拟像面位置处波面信息与被测件处波面信息一致。因此,如何将 CCD 接收的干涉图信息转化为虚拟像面处的波面信息是无镜成像算法的关键。

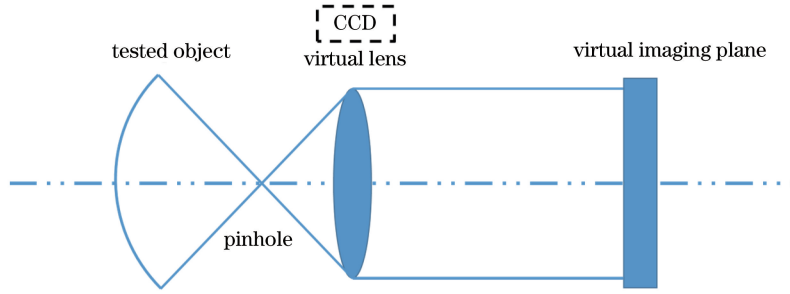


图 2 虚拟准直透镜的放置

Fig. 2 Placement of virtual collimating lens

球面波通过虚拟准直透镜准直,转换为平面波,实质上即两者复振幅函数的转换:

$$\begin{cases} U_p = U_s \cdot P_f(x, y) \\ P_f(x, y) = \exp\left(ik \frac{x^2 + y^2}{2f}\right), \end{cases} \quad (1)$$

式中 U_p 为平面波复振幅函数, U_s 为球面波复振幅函数, $P_f(x, y)$ 为虚拟透镜透射因子, k 为波数, f 为虚拟透镜焦距。

虚拟透镜中虚拟像面与被测件位置共轭。两者满足物像关系:

$$\frac{1}{R + f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

式中 R 为被测件曲率半径, d 为 CCD 到虚拟像面的距离, 由图 2 可知, 虚拟透镜焦距 f 等于针孔到 CCD 距离。 f, R 为已知量, 由 (2) 式计算 CCD 到虚拟像面的距离 d , 即平面波的衍射距离。无镜成像算法对 CCD 处带衍射效应的干涉图复原实际上是基于 CCD 靶面处与虚拟像面处的波面关系建立数学模型, 解决衍射问题^[14]。

光衍射模型中输入输出的物理量均是包含振幅与相位的光场函数, 点衍射干涉系统中, CCD 接收到的包含衍射图样的干涉图是光场强度函数, 需通过计算得到光场复振幅 U_0 ,

$$U_0 = E + T \exp(i\varphi), \quad (3)$$

式中 E 为参考光振幅, T 为测试光振幅, φ 为参考光与测试光之间的相位差分布函数。求取 E, T, φ , 即可得到干涉图复振幅 U_0 。

通过移相算法^[15]计算 φ :

$$\begin{cases} I_1 = a + b \cos \varphi \\ I_2 = a + b \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) = a - b \sin \varphi \\ I_3 = a + b \cos(\varphi + \pi) = a - b \cos \varphi \\ I_4 = a + b \cos\left(\varphi + \frac{3\pi}{2}\right) = a + b \sin \varphi \end{cases}, \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}, \quad (5)$$

式中 a 为背景光强, b 为对比度, 由四步移相公式得:

$$\begin{cases} a = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}{4} \\ b = \frac{(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2}{4} \end{cases}, \quad (6)$$

a, b 与参考光测试光振幅 A, B 存在对应关系:

$$\begin{cases} a = A^2 + B^2 \\ b = 2AB \end{cases} \quad (7)$$

根据(6)、(7)式,计算得到 A, B ,但无法分辨 A, B 的光波特性。据图 2 的模型,通过虚拟透镜后的理想参考光,其振幅大小可视作常数,记作 C 。如将 b 视为测试光光强,对应的振幅记作 b_T ,大小等于 b 。常数 C 取值应与 b_T 匹配。由上述可得

$$\begin{cases} E = C \\ T = b_T \end{cases}, \quad (8)$$

将(5)、(8)式代入(3)式,复振幅 U_0 可表示为

$$U_0 = C + b_T \exp(i\varphi) \quad (9)$$

平面波的波面衍射传输一般采用平面波角谱理论。由(4)、(5)、(6)、(9)式,解得 CCD 采集的干涉图复振幅 U_0 ,再结合 CCD 到虚拟像面的距离 d ,代入角谱公式

$$U_d = U_0 \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}\right], \quad (10)$$

解得虚拟像面处的波面函数 U_d , (10)式中 (f_x, f_y) 为频谱函数的坐标。虚拟像面处的波面 U_d 等价于被测件处的波面信息。

求解被测波面的无镜成像算法流程图如图 3 所示。

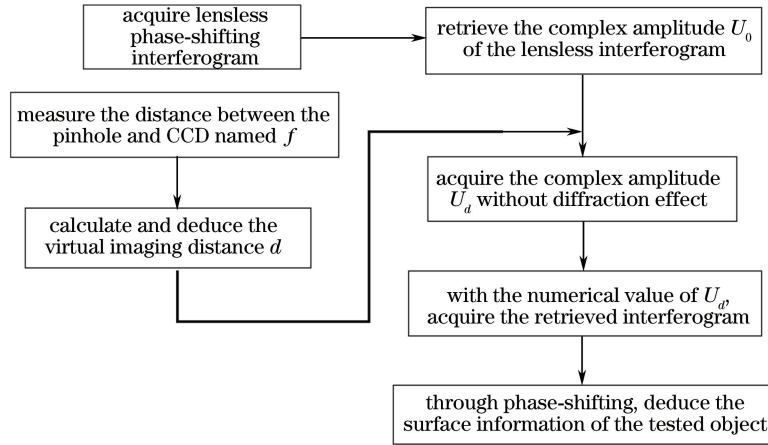


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

3 仿真分析

为证实上述算法的可行性,采用数值仿真手段,考察无镜成像算法的精度,分析传输距离误差引起的波面测量误差。

3.1 无镜成像算法的仿真

假设光波长为 632.8 nm , CCD 像元尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$, 针孔到 CCD 距离为 28.5 mm , 被测球面曲率半径为 480 mm , 孔径为 80 mm 。设定针孔到 CCD 距离为虚拟透镜焦距,由物象共轭关系计算得到 CCD 到虚拟像面的距离为 30.4 mm 。运用 Zernike 波面拟合方法^[16] 给定被测件波面,波面误差波峰波谷 (PV) 值为 0.3111λ , 均方根 (RMS) 值为 0.0760λ 。被测波面如图 4 所示。被测波面产生干涉图:

$$I = 1 + \cos(2\pi\psi), \quad (11)$$

式中 ψ 为仿真的被测波面的相位。如图 5 所示,球面波干涉叠加图 5(a) 与通过准直透镜转换后的平面波叠加图 5(b) 的结果一致。因此,在无镜成像技术中,通过准直透镜实现球面波向平面波转换,对于光波的叠加不会引入额外的像差。

无镜成像状态下,波面衍射主要包含两种:1) 针孔衍射出的。测试球面波经被测件反射回针孔,由于被

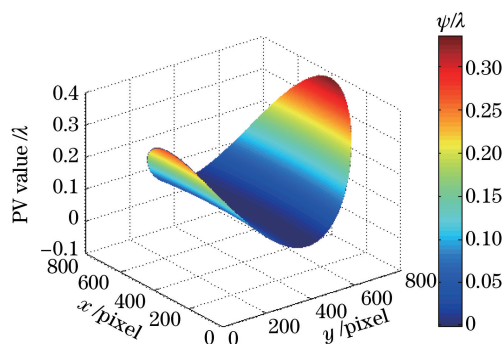


图 4 仿真给定的被测件波面

Fig. 4 Phase plane given by simulation

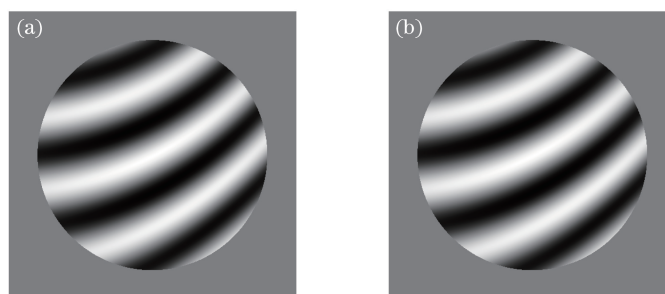


图 5 (a) 一束携带像差的球面波与一束理想球面波叠加的干涉图; (b) 两束球面波经过准直透镜转换为平面波的叠加干涉图

Fig. 5 (a) Interferogram obtained by interference of a bunch of spherical wave with aberration and a bunch of ideal spherical wave; (b) interferogram obtained by two bunches of spherical waves collimated to plane waves

测件的孔径限制,引入出瞳衍射;2)出瞳衍射后的。测试球面波与理想参考球面波叠加干涉,自由空间传输到 CCD 靶面,这是一种传输衍射。

因此,去除成像系统之后,一方面因为被测件孔径限制导致出瞳衍射,干涉图边缘出现边缘衍射环;另一方面由于光场衍射传输引入衍射效应,CCD 直接采集获得的干涉图信息会引入中心衍射环,如图 6(a)所示。实验中,一般需要对采集的干涉图进行移相处理。无镜成像算法中无法直接将干涉图信息作为输入,因此要将干涉图光强信息转换为复振幅信息^[17]。按照移相算法(图 3)对干涉图光强信息进行转换,结果如图 6(b)所示。将图 6(b)结果代入无镜成像算法,结合传输距离、虚拟透镜焦距等数据,可得后续用于移相算法的干涉图如图 6(c)所示。由仿真结果可知经无镜成像算法复原后的干涉图边缘衍射环以及中心衍射环都被有效消去。

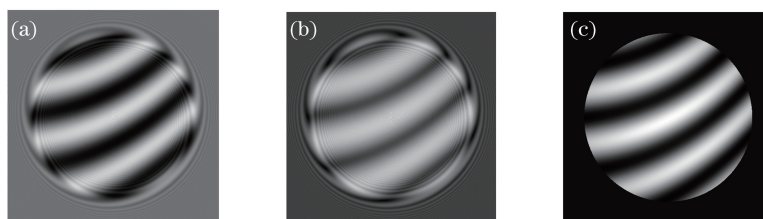


图 6 (a) 仿真得到光强表示的无镜成像干涉图; (b) 移相算法复原的复振幅表示的干涉图; (c) 无镜成像算法复原的干涉图

Fig. 6 (a) Interferogram simulated without imaging system; (b) interferogram retrieved by phase-shifting algorithm; (c) interferogram retrieved by lensless algorithm

图 6(c)为无镜成像算法理想复原情况,而在实际测量中,去除干涉成像系统之后,为了得到完整的干涉图和有效利用像素阵列,CCD 靶面必须靠近点衍射板,针孔到 CCD 的距离很难精确测量^[18-19]。前文已述,虚拟透镜的焦距与其相等,并由其计算出虚拟像面的位置。因此,该距离误差是影响被测波面复原精度的主

要因素。如针孔到 CCD 距离测量不准确, CCD 到虚拟像面的衍射距离也就不准确, 衍射环将去除不彻底。

3.2 距离误差分析

被测件与 CCD、针孔的位置关系为

$$\frac{D}{R} = \frac{N \times p}{f}, \quad (12)$$

式中 D 为被测件孔径大小, R 为被测件曲率半径, N 为干涉图所占像素点数, p 为像元尺寸, f 为虚拟透镜的焦距, 也是针孔到 CCD 距离, 由(12)式可得,

$$f = \frac{N \times p \times R}{D}. \quad (13)$$

对(13)式进行误差分析, 可得

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta D}{D}, \quad (14)$$

假设 CCD 像素点数测量误差为 2, 被测件曲率半径误差为 $\pm 1\%$, 被测件孔径测量误差为 0。代入(14)式, 可得针孔到 CCD 距离误差为 $\Delta f = 0.3406$ mm。由虚拟透镜的成像关系[(2)式], 结合误差计算公式得

$$\Delta d = \left(1 + \frac{2f}{R}\right) \times \Delta f - \frac{f^2}{R^2} \times \Delta R. \quad (15)$$

代入数据得 $\Delta d = 0.3641$ mm。在考虑距离误差因素时, 给出余量, 选取距离误差为 0~1 mm 区间, 开展无镜成像系统中距离误差对最终被测波面复原精度的影响研究。

实际应用中, 不只是直观观察干涉图的衍射环去除效果, 更关注是否准确复原了被测波面信息, 尤其是相位信息。为此, 假设距离误差在 0~1 mm 范围内变化, 将此时的干涉图相位复原信息与距离误差为 0 mm 时的相位相减, 得到距离误差引入的被测波面相位误差, 误差变化趋势如图 7 所示。

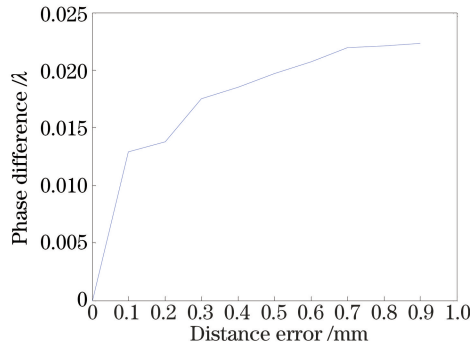


图 7 距离误差在 0~1 mm 区间内的复原相位误差

Fig. 7 Retrieved phase difference of interferogram with distance errors within the range of 0-1 mm

如图 7 所示, 随着距离误差的变大, 复原相位误差会越来越大。在实验室环境下, 针对球面曲率半径为 480 mm, 孔径为 80 mm 的待测件, 如要点衍射干涉仪具有 $\lambda/50$ 的测量准确度, 距离误差需控制在 0.7 mm 以内。图 7 给出的随距离误差变化的波面相位误差不能反映距离误差引起的波面相位误差的分布情况。为了解析误差分布规律, 可以选取波面相位误差较大的 1 mm 距离误差, 分别采集 100%、98%、94% 孔径大小的干涉图, 进行被测波面的复原, 将其与距离误差为 0 时的波面相位相减, 结果如图 8 所示。

如图 8 所示, 随着干涉图采集区域由边缘向中心变化, 在最大距离误差情况下, 被测波面复原误差也变小, 因此, 距离误差主要引入干涉图边缘处的相位误差, 对干涉图中心处相位影响不大。

无镜算法主要针对大数值孔径的光学元件, 因此需要对大数值孔径的光学元件进行误差分析, 以 $NA = 0.25$, $f = 480$ mm 的光学元件为例, 根据(12)~(15)式, 计算可得此时的系统距离误差 $\Delta d = 0.1181$ mm

给出余量, 选取距离误差为 0~0.4 mm, 开展无镜成像系统中距离误差对最终被测波面复原精度的影响研究。按照同样算法过程, 距离误差对波面复原精度的影响结果如图 9 所示。由图 9 可以看出, 大数值孔径 ($NA = 0.25$) 情况下, 距离误差变得敏感, 0.1 mm 的距离误差可引起约 0.021λ 的波面复原误差。

在实验室环境下, 针对 $NA = 0.25$, $f = 480$ mm 的被测件, 如要点衍射干涉仪具有 $\lambda/50$ 的测量准确度,

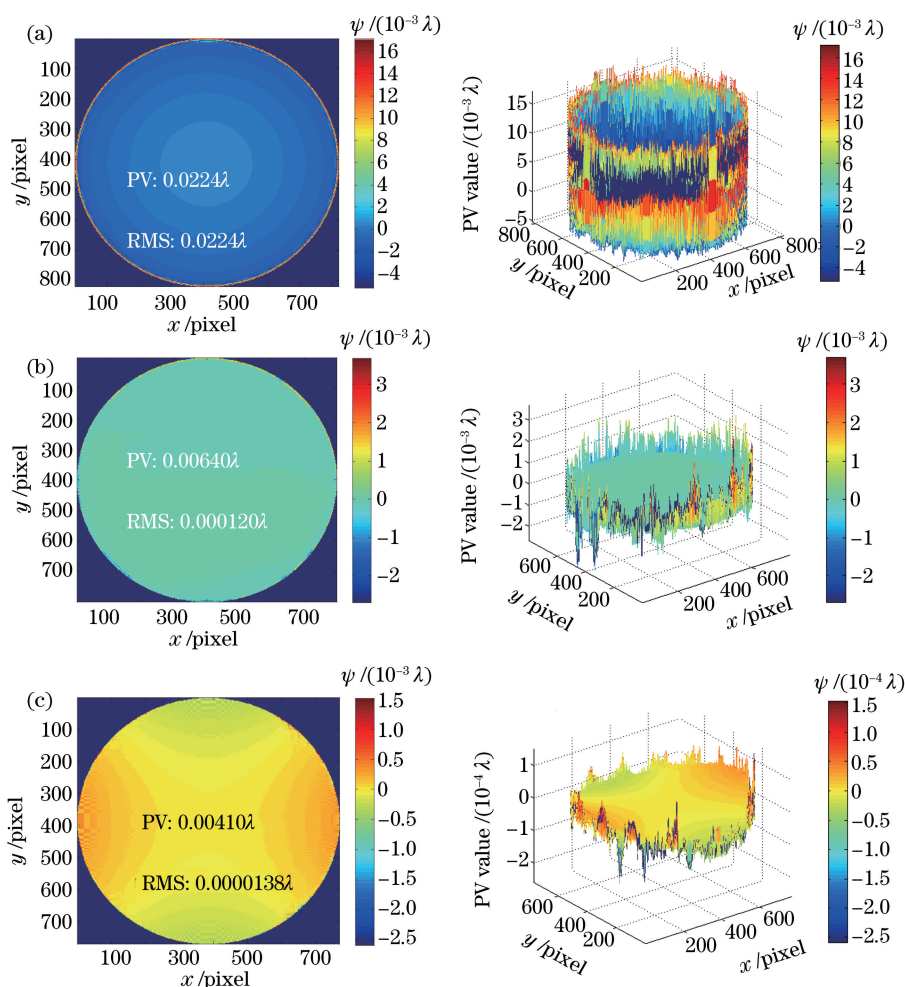


图 8 孔径大小为 (a) 100%, (b) 98%, (c) 94% 条件下距离误差为 1 mm 时复原干涉图与无距离误差时的相位差值
 Fig. 8 Phase difference between retrieved interferogram for (a) 100%, (b) 98%, (c) 94% numerical aperture when distance error is 1 mm and interferogram retrieved when distance error is 0 mm

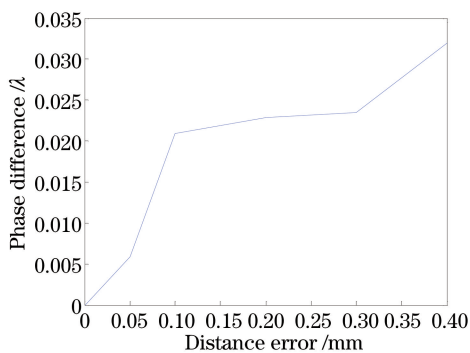


图 9 $NA=0.25$, 距离误差在 0~0.4 mm 区间内的复原相位误差

Fig. 9 Phase difference of interferogram retrieved with a distance error within the range of 0-0.4 mm when $NA=0.25$

距离误差需控制在 0.1 mm 以内。

4 实验验证与分析

无镜成像的实验装置在实验室有镜成像针孔式点衍射干涉仪上改进, 有镜成像点衍射干涉装置如图 10 所示, 装置中稳频 He-Ne 激光器的工作波长为 632.8 nm, 扩束镜扩大倍数为 8 倍, 针孔反射镜上刻蚀了直径为 $1 \mu\text{m}$ 的衍射孔, 经过绝对检验标定, 在含有干涉成像系统时其测量准确度优于 $\lambda/50$ ^[20]。

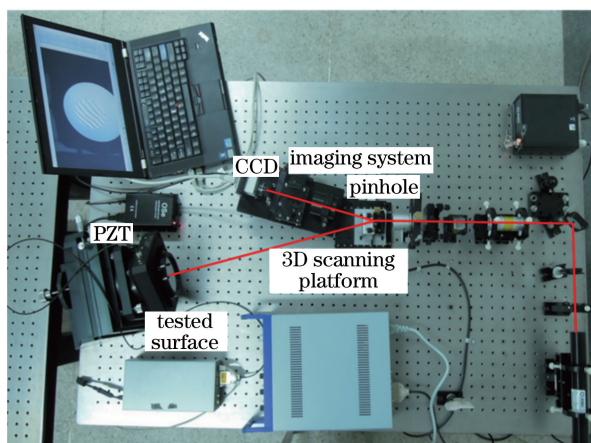


图 10 针孔式可见光点衍射干涉仪实验室装置

Fig. 10 Experimental setup of pinhole type visible light diffraction interferometer

为开展无镜成像技术的研究,将实验室点衍射干涉系统中的成像系统部分去除,将 CCD 放置在靠近点衍射板的位置,直接接收来自衍射针孔的光束^[21],如图 11 所示。

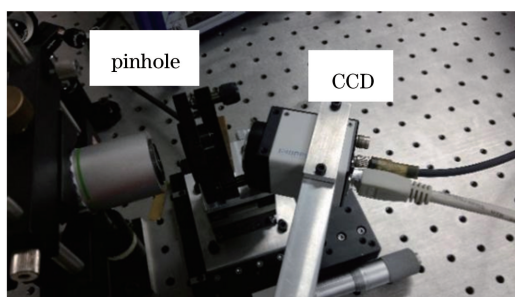


图 11 去除成像系统后 CCD 与点衍射板相对位置

Fig. 11 Relative position between the CCD and the point diffraction plate after removing imaging system

实验中,采用曲率半径 489 mm、口径为 80 mm 的被测件(受当前 CCD 尺寸的限制,后续可以检测更大相对孔径的球面元件^[22]), CCD 采样分辨率为 1600 pixel × 1200 pixel,量化等级为 12 bit,像元尺寸为 4.65 μm × 4.65 μm。使用上述实验装置采集多幅带有衍射环的移相干涉图。

针对 CCD 直接采集的带衍射环干涉图,采用移相算法复原其复振幅信息,根据(12)式,由被测件数值孔径大小及干涉图所占像素数可确定点衍射板到 CCD 的距离,经计算得距离约为 28.5 mm。无镜成像算法实施时,在 CCD 处引入虚拟准直透镜,以点衍射板上的针孔为虚拟准直透镜焦点,设定测得点衍射板到 CCD 的距离等于虚拟透镜的焦距。点衍射板到被测件距离等于被测件曲率半径。结合上述数据,根据(2)式,计算得到 CCD 到虚拟像面距离为 30.4 mm,再按照图 3 所示无镜成像算法流程,处理得到消衍射环干涉图。

将无镜成像装置采集的原始干涉图 12(a),与无镜算法处理的干涉图 12(b),以及有镜成像采集的干涉图 12(c)三者进行对比,图 12(c)中存在明显的相干噪声,但应用无镜成像系统与相应算法复原的干涉图[图 12(b)]中相干噪声被有效地抑制,干涉图边缘的衍射环及中心的衍射环被有效去除,得到了较为清晰的干涉图。

为了验证无镜成像算法的正确性,按照移相算法的要求分别采集四幅干涉图,将带衍射环干涉图、简单切除边缘衍射环的干涉图、无镜成像算法复原的干涉图、有镜成像系统采集的干涉图,应用四步移相算法计算得到的被测波面结果如图 13 所示。

图 13(a)中带衍射环干涉图由于边缘衍射效应的存在,相位复原难度很大,被测件面形边缘细节信息无法被正确提取。图 13(b)简单去除了干涉图的边缘衍射环,波面结果中明显带有中心衍射效应的影响,不是被测波面误差的真实信息。图 13(c)为无镜成像算法有效去除边缘衍射与中心衍射条纹后,复原干涉图的波面计算结果。图 13(d)为有镜成像的波面复原结果。由图 13 给出的被测波面复原结果可知:1)直接采用

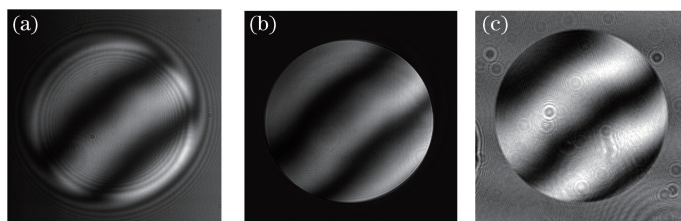


图 12 (a) 无镜装置采集图; (b) 无镜成像算法复原干涉图; (c) 有镜成像干涉图

Fig. 12 (a) Interferogram collected by the lensless imaging system; (b) interferogram retrieved by the lensless algorithm; (c) interferogram collected by the imaging system with lens

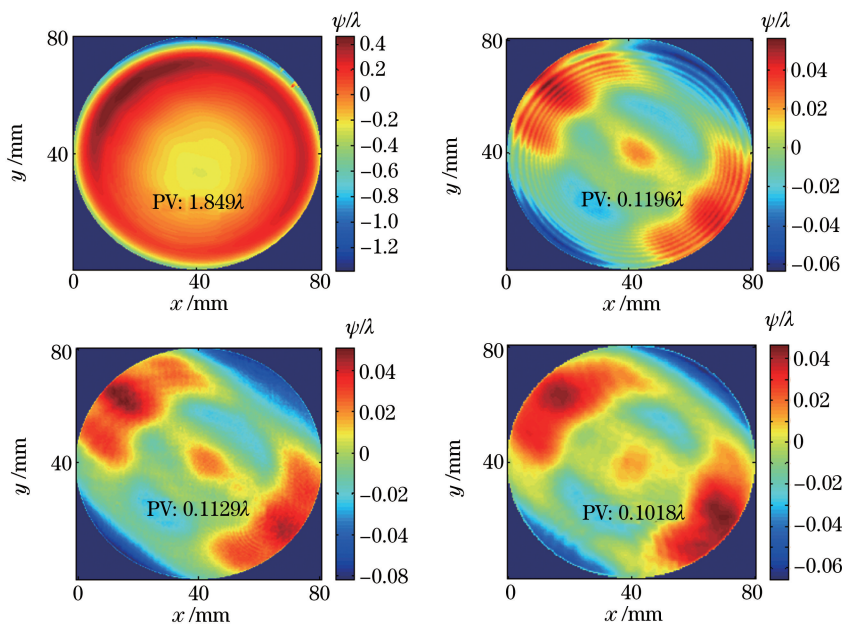


图 13 (a) 带衍射环干涉图相位; (b) 带衍射环干涉图切除边缘后的相位; (c) 无镜成像算法复原干涉图相位; (d) 有镜成像干涉图相位

Fig. 13 (a) Phase of interferogram with diffraction rings; (b) phase of edge removed interferogram with diffraction rings; (c) phase of interferogram retrieved by lensless algorithm; (d) phase of interferogram captured by imaging system with lens
包含衍射环的干涉图计算被测波面误差,没有准确反映被测球面斜纹面形误差缺陷; 2)简单扣除边缘衍射条纹的干涉图复原结果,波面误差包含圆条纹状伪信号; 3)有镜成像的波面计算结果与无镜成像算法得到的波面计算结果,均正确地给出了被测波面中的斜纹误差缺陷,同时,无镜成像算法能有效消除干涉图中的边缘衍射与中心衍射条纹引入的相位误差,并且因没有相干噪声,被测波面结果没有出现相干噪声带来的波面细纹误差。

5 结 论

针对高精度点衍射干涉成像系统引入的相干噪声误差,提出了无镜成像干涉图复原算法。该算法首先建立了有效去除干涉图中边缘衍射与中心衍射条纹的算法数学模型与计算流程,再对被测波面进行数据仿真,按照算法流程实现无镜成像以及干涉图复原过程。针对影响算法复原精度的关键影响因素——距离误差进行分析,给出了不同距离误差下的被测波面误差结果。基于该算法搭建无镜成像实验装置,并实现了高精度测量实验,仿真与实验结果都较好地验证了算法的有效性与可行性。

参 考 文 献

- [1] Malacara D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [2] Sommargren G E, Phillion D W, Johnson M A, *et al.* 100-picometer interferometry for EUVL[C]. SPIE, 2002,

4688: 316-328.

- [3] Matsuura T, Okagaki S, Oshikane Y, *et al.* Numerical reconstruction of wavefront in phase-shifting point diffraction interferometer by digital holography[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2008, 40(6-7): 1028-1032.
- [4] Chkhalo N I, Pestov A E, Salashchenko N N, *et al.* Manufacturing of diffraction quality optical elements for high resolution optical systems[C]. *SPIE*, 2009, 7521: 752104.
- [5] Takeuchi S, Kakuchi O, Yamazoe K, *et al.* Visible light point-diffraction interferometer for testing of EUVL optics [C]. *SPIE*, 2006, 6151: 61510E.
- [6] Xu Yangbo, Wang Daodang, Wang Zhichao, *et al.* Lateral displacement calibration method for point-diffraction wavefront interferometric measurement without imaging lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812007.
徐杨波, 王道档, 王志超, 等. 点衍射波前无镜头干涉测量中横向偏移误差校正方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812007.
- [7] Zhu W H, Chen L, Zheng D, *et al.* Lensless reflective point diffraction interferometer[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(19): 5158-5163.
- [8] Wang Daodang, Xu Yangbo, Chen Xixi, *et al.* Absolute displacement measurement with point-diffraction interferometer based on quick searching particle swarm optimization algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0112001.
王道档, 徐杨波, 陈茜茜, 等. 基于快速搜索粒子群算法的点衍射干涉绝对位移测量方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0112001.
- [9] Li Jinpeng, Chen Lei, Zhu Wenhua, *et al.* Point diffraction interferometry based on phase demodulation technique for circular carrier interferogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112001.
李金鹏, 陈磊, 朱文华, 等. 基于圆载频干涉图相位解调技术的点衍射干涉术[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112001.
- [10] Zhang Xinting. Study on wavefront phase retrieving and coherent diffractive imaging based on sampling arrays [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
张新廷. 基于抽样的波前相位恢复和相干衍射成像方法研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [11] Li Junchang, Chen Jinbo, Fan Zebin, *et al.* The Kirchoff transfer function and Rayleigh-Sommerfeld transfer function of diffraction[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002(1): 87-89.
李俊昌, 陈劲波, 樊则宾, 等. 衍射的基尔霍夫传递函数及瑞利-索末菲传递函数[J]. *光电子 • 激光*, 2002(1): 87-89.
- [12] Feng Xiaofang. Propagation of light beams through optical system with hard-edge aperture [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2009.
冯小芳. 光束通过含有硬边光阑光学系统的传输[D]. 成都: 四川师范大学, 2009.
- [13] Wang Fei, Tang Yong, Feng Jinliang, *et al.* Newtonian formula's application in lens transformation of Gaussian beam [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2006, 29(2): 11-13.
王菲, 唐勇, 冯进良, 等. 牛顿公式在高斯光束透镜变换中的应用[J]. *长春理工大学学报*, 2006, 29(2): 11-13.
- [14] Shi E C, Ng J J, Lim C M, *et al.* Compact lensless digital holographic microscopy using a curved mirror for an enlarged working distance[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(14): 3771-3775.
- [15] Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing, *et al.* A new algorithm on phase shifting interferometry: the overlapping averaging 4-frame algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(12): 1288-1293.
朱日宏, 陈进榜, 王青, 等. 移相干涉术的一种新算法: 重叠四步平均法[J]. *光学学报*, 1994, 14(12): 1288-1293.
- [16] Ye Jingfei, Gao Zhishan, Liu Xiaoli, *et al.* Freeform surfaces reconstruction based on Zernike polynomials and radial basis function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0822003.
叶井飞, 高志山, 刘晓莉, 等. 基于 Zernike 多项式和径向基函数的自由曲面重构方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0822003.
- [17] Dong Zheliang, Feng Guoying, Hu Lili, *et al.* Measure the complex amplitude of laser mode by Mach-Zehnder point diffraction interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0708008.
董哲良, 冯国英, 胡丽荔, 等. 基于马赫-曾德尔点衍射干涉仪的激光模式复振幅测量[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0708008.
- [18] Shao Weihong, Yang Yongying, Chen Xiaoyu, *et al.* Optimization research on optical structural parameters of point diffraction interference system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5): 10-16.
邵卫红, 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]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(5): 10-16.

- [19] Xu Jiajun, Xing Tingwen, Xu Fuchao. Calibration of the system errors in pinhole diffracted interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712003.
许嘉俊, 邢廷文, 徐富超. 点衍射干涉仪系统误差标定[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712003.
- [20] Yuan Qun. Research on high precision testing of spheres with fast focal ratio by phase shifting interferometry[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
袁 群. 快焦比球面元件的高精度移相干涉测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [21] Ling T, Liu D, Yang Y Y, *et al.* Off-axis cyclic radial shearing interferometer for measurement of centrally blocked transient wavefront[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2493-2495.
- [22] Chen X Y, Yang Y Y, Wang C, *et al.* Aberration calibration in high-NA spherical surfaces measurement on point diffraction interferometry[J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 3877-3885.