

大镜面在位检测中的相位恢复技术研究*

李圣怡, 胡晓军, 吴宇列

(国防科技大学 机电工程与自动化学院 精密工程实验室, 长沙 410073)

摘要: 为了满足大型光学镜面加工对在位检测的需求, 探索了一种应用相位恢复技术的新型镜面测量方法. 构建了基于离焦光场的相位恢复测量系统并实现了与此系统相适应的相位恢复算法, 此测量系统结构简单且不易受环境振动影响. 在此系统基础上, 详细分析了各种误差因素以及系统测量准确度和测量范围, 并针对在位检测的特点和要求, 研究了此方法在应用中的可靠性. 对一面口径 430 mm 的球面反射镜进行了分平台在位测量实验. 实验中分析了不同测量参量对测量结果的影响. 相位恢复测量与干涉测量结果对比较为吻合. 理论分析和实验都表明该方法切实可行, 检测准确度满足光学镜面研抛加工要求.

关键词: 应用光学; 相位恢复; 镜面面形测量; 在位检测

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-365-6

0 引言

在空间光学、军事等领域中, 大口径光学元件已成为起关键作用的部件. 对大口径高精度光学元件的制造来说与之准确度相适应的检验方法和仪器显得尤为重要. 在大型光学镜面的精研和抛光过程中, 由于其面积和体积较大, 不便于移动, 因而加工中对在位测量提出很大需求. 这些需求可概括为: 1) 希望检测装置能够适应加工环境, 具有抗振动功能, 以便实现分平台检测; 2) 测量准确度高, 达到光学加工要求; 3) 测量横向分辨率高, 能够识别镜面上的局部误差.

通常使用的干涉仪必须与被测零件共平台隔振以排除振动带来的干扰. 抗振动干涉仪虽然在很大程度上解决了振动问题, 但其价格较高, 还未得到普及. 另外刀口仪和哈特曼波前传感器是两种基于几何光学测量方法, 不易受振动影响. 但刀口仪测量不易量化, 无法支持计算机数控加工. 哈特曼波前传感器的横向测量分辨率较低(目前最高为 128×128), 难以发现大型镜面上的局部误差.

为了满足大型光学镜面加工检测的需求, 本文研究了一种基于相位恢复(Phase Retrieval)的光学镜面面形在位检测技术. 相位恢复技术是一种利用相干光场衍射传播中的光强信息, 通过优化迭代计算, 来恢复入射波面相位的检测方法^[1-3]. 相位恢复技术从一系列, 由同一束测量光产生的衍射光强图像中获取镜面面形信息, 而衍射图像不同于干涉条

纹, 它受环境振动影响很小, 这大大降低了对测量环境的要求, 使相位恢复技术具备了在位检测的基本条件.

本文介绍了相位恢复测量的系统构成以及算法原理, 同时还详细分析了各种误差因素, 并研究了此方法在实际应用中的可行性与可靠性. 使用相位恢复技术对一面口径 430 mm 的球面反射镜进行了分平台在位测量实验. 实验表明该方法是切实可行的, 测量准确度高且操作简单, 测试结果与干涉测量较为符合, 可满足光学镜面加工测量要求.

1 相位恢复测量系统构成和工作原理

1.1 相位恢复测量系统构成

相干光波在自由空间衍射传播理论表明入射光波传波一定距离后会形成一定的强度分布. 出射光波面强度分布会随着入射光波面的相位分布而发生变化. 相位恢复技术就是通过测量出射光波面的强度信息来反推入射波面相位的一种方法.

利用以上原理, 设计了针对球面镜检测的相位恢复测量系统, 如图 1. 采用激光点光源发出球面波, 球面波被镜面反射后形成含有相位误差的球面

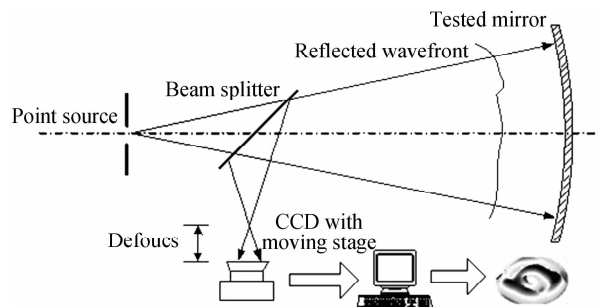


图 1 相位恢复测量示意
Fig. 1 Schematic of phase retrieval testing

* 国家自然科学基金(50775217)资助

Tel: 0731-4574937 Email: hu_xiaojun_nudt@yahoo.com.cn

收稿日期: 2007-07-09

波,经过分光镜,一部分反射光传播到焦点附近的 CCD 像元阵列平面上. CCD 相机被安置在一个移动平台上,可以沿光轴移动,以便在焦点前后接收不同位置上的图像. 获取这些图像后再进行算法处理,可以精确地计算出被测镜的面形误差.

1.2 球面波光场衍射计算和面形恢复算法

相位恢复测量的硬件构成虽然简单,但要获取被测波面还要经过相对复杂的软件处理过程. 要进行相位恢复计算首先必须正确地建立入射光场与出射光场的计算模型,并且能够进行快速的计算机处理. 光波的标量衍射理论能够较为准确地描述光场在宏观上的传播行为^[4],已经成功地用于衍射光学器件设计^[5-6]等工程领域.

根据标量衍射理论,在给定输入光场 $g_1(x, y, z_1)$ 后,为了计算输出光场 $g_2(x, y, z_2)$,在非涅耳近似条件下,可由文献^[7]得到

$$F_1(v_x, v_y) = \iint g_1(x, y) \exp(-j2\pi v_x x - j2\pi v_y y) dx dy \quad (1)$$

$$F_2(v_x, v_y) = F_1(v_x, v_y) \exp[j\pi\lambda(v_x^2 + v_y^2) \cdot (z_2 - z_1)] \quad (2)$$

$$g_2(x, y) = \iint F_2(v_x, v_y) \exp(j2\pi v_x x + j2\pi v_y y) dv_x dv_y \quad (3)$$

式中 λ 为光波长.

式(1)表示对入射的光场进行傅里叶变换得到 $g_1(x, y)$ 的频谱 $F_1(v_x, v_y)$. 式(2)将 $F_1(v_x, v_y)$ 衍射到输出平面,得到 $g_2(x, y)$ 的频谱 $F_2(v_x, v_y)$,再通过式(3)对 $F_2(v_x, v_y)$ 进行傅里叶逆变换可得到 $g_2(x, y)$.

虽然计算式(1)~(3)可以使用 FFT 算法. 但式(1)~(3)适于计算平面波到平面波的衍射计算. 对于图 1 中的汇聚球面波到球面波的衍射,直接应用式(1)~(3)会遇到两方面的问题. 首先,进行(1)和(3)式 FFT 计算时需要满足采样定理,而汇聚波面含有球面波因子 $(1/z) \exp[-j\pi(x^2 + y^2)/(\lambda z)]$,其空间变化速度快(因为一般 λ 很小),要求 FFT 的空间采样间隔足够小. 另外,进行式(2)的频谱衍射计算时,要求有足够的频谱分辨率,频域分辨率小则要求空间的采样范围足够大. 以上两点会造成采样点数过多,无法进行计算处理. 为了提高计算效率,还需引入 Sziklas 和 Siegman 提出的坐标变换的方法^[8]. 该变换方法可从波函数 $g(x, y, z)$ 中分离球面波因子,实现快速的衍射计算,这里不再赘述.

获取衍射图像后,可以使用 GS(Gerchberg-Saxton)算法恢复入射波面的相位分布,如图 2.

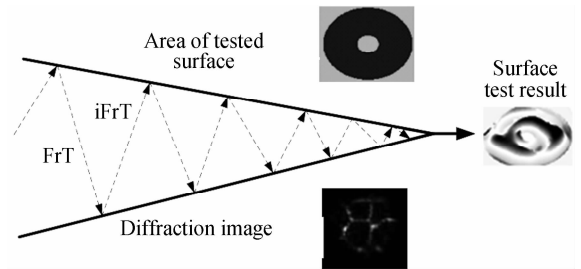


图 2 GS 迭代算法示意

Fig. 2 Schematic of GS algorithm

GS 算法在输入平面,即被测镜面和 CCD 观测平面之间进行反复迭代运算. 每次迭代包括正向衍射运算(记为 FrT)和反向衍射运算(记为 iFrT). 每次 FrT 中,将镜面的波面函数 $g_o(x, y)$ 加以镜面形状区域的约束 $A(x, y)$ 后通过衍射计算得到第 i 个离焦平面的衍射光场,如式(4).

$$g_i^i(x, y) \text{FrT}[A(x, y)g_o(x, y)] \quad (4)$$

每次 iFrT 的运算中,先将保留相位,用测量得到的衍射图像幅值 $I_i(x, y)$ 作为幅值形成新的输出光场函数 $\sqrt{I_i(x, y)} \exp[j\varphi(g_i^i(x, y))]$,然后反向衍射计算到镜面位置,得到对输入光场的一个估计 $\hat{g}_o^i(x, y)$ 如式(5).

$$\hat{g}_o^i(x, y) = \text{iFrT}\{\sqrt{I_i(x, y)} \exp[j\varphi(g_i^i(x, y))]\} \quad (5)$$

将多个 $\hat{g}_o^i(x, y)$ 取加权平均即可得到新的 $g_o(x, y)$,如式(6),其中 N 为图像总数.

$$g_o(x, y) = \frac{1}{N} \sum_i \hat{g}_o^i(x, y) \quad (6)$$

设 E 为每次迭代中的计算光强与实际测量光强的误差, $E = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N |I_i(x, y) - |g_i^i(x, y)|^2|$,其中 M 为每张图像的采样点数. 每次迭代后 E 会减少,当 E 在每次迭代后的相对变化量小于一定值后,可认为算法已收敛. 将波面函数 $g_o(x, y)$ 的相位进行相位解包络(Phase Unwrap)后即获得镜面的误差分布.

2 相位恢复测量误差和准确度分析

虽然相位恢复测量的系统结构较简单,但同样存在各类影响准确度的误差因素. 根据相位恢复测量的特点,为了便于认识各类误差的性质,把误差因素分为 I 类误差和 II 类误差. I 类误差指通过影响镜面反射光波面的面形而直接影响测量准确度的误差; II 类误差因素是指通过影响图像信号的获取准确性而间接影响面形恢复准确度的误差.

2.1 I 类误差

I 类误差主要包括: 1) 光源与被测镜相对位置误差,也就是指点光源与被测镜的顶点曲率中心对

位不准时会产生的轻微离焦和离轴;2) CCD 移动平台的运动方向与光传播方向之间的夹角倾斜误差;3) 测试光源的波面误差,主要由激光光源、镜头以及分光镜等光学器件的制造和装调误差引起的波面面形与理想球面波之间的误差。

在 I 类误差中,光源的位置和和 CCD 平台运动误差可以在测量中通过细致的装调将其控制在一定范围内,并在测量结果中去倾斜和离焦即可将其影响基本消除,也就是如果处理得当此类误差影响可以忽略。一般球面波激光光源波面误差 PV 值(Peak to Valley)可做到 0.2 波长左右,考虑到反射波面误差是镜面误差的两倍光程差,在加之对光源误差的测试标校及误差补偿,根据现有水平,可以做到 0.1 波长以下。对于光源波面误差的控制,应着重选取准确度较高的器件设备,同时注意控制测量工作环境。

2.2 II 类误差

II 类误差是通过影响衍射图像信号的正确获取,从而间接的影响测量结果的误差因素。其中主要包括:1) CCD 图像采样转换误差,主要涉及 CCD 器件的信噪比、动态范围等因素;2) CCD 姿态误差,指当 CCD 移动调节平台运动时,由于位置误差、导轨直线度以及 CCD 阵列面的法向与导轨运动方向安装不重合带来的实际位置上采集的图像与理想位置上图像之间的差别;3) 光源稳定性误差,主要指由于激光器的波长和输出功率不稳定而造成集图像信号的误差;4) 环境光干扰误差,指外界杂散光对 CCD 采光造成的影响。

由于 II 类误差,都可归结为对衍射图像的影响,因而它们对准确度的影响可通过分析图像不确定度与测量结果不确定度的传递关系来确定。仿真数值计算表明,图像数据不确定度与测量结果不确定度基本上成线性关系且在一个数量级上。II 类误差大多表现为图像噪音,一般当图像噪音的能量占图像总能量(即图像光强总和)的 1% 时,会给波面相位测量结果 PV 值带来 1%~2% 波长的变化(具体数值还要根据被测镜和测量系统的参量来计算)。通过这一不确定度传递关系,可以量化分析 II 类误差对测量结果的影响。

在 II 类误差中,光源的功率波动虽然会带来各个图片之间总强度的变化,但如果对图像强度进行归一化处理就会排除其影响。CCD 运动平台的安装位移误差和外界杂散光,根据实验现象,只要处理得当,给图像带来的噪音至多相当于 2% 图像总能量,传递到面形误差应小于 4% 波长。对于一般工程级 CCD 相机,其信噪比可以保证在 256:1 以上,传递

到面形误差应小于 1% 波长。因此,对于上述 II 类误差,综合起来对测量结果的影响可以控制在 5% 波长以内。在 II 类误差中,可能影响最大的是 CCD 的采样饱和带来的误差。这种情况是当镜面含有较大局部误差时,光场能量集中在 CCD 局部上造成的。但如果用降低光强来避免饱和,则会使图像其它区域太暗而不能分辨。测量误差与图像饱和程度成正比,如果饱和太严重,虽然误差的方向基本不会测错,但饱和区域所对应的面形数值会有较大出入,测量结果只能用作定性分析。

综合各种误差因素,可以看出当被测镜面存在较大误差时,也就是研抛加工的初始阶段,应当首先注意 CCD 的采样饱和情况。随着加工过程的进行,当被测镜面误差较小,如误差收敛到 0.5 个波长以内后,光源的波面误差对测量的影响会变得最明显。根据现有技术水平,在 CCD 的采样不饱和的情况下,考虑光源和图像噪音误差,测量准确度应在处在 PV 值 0.15 到 0.1 个波长水平。目前这一准确度指标是可以保证研抛加工的误差收敛的。

3 相位恢复在位测量可靠性分析

光学镜面在位测量的根本目的是给加工者提供镜面误差分布信息,使得镜面误差随着加工过程而收敛。镜面误差信息包括三个方面:误差的位置、误差的方向以及误差的大小。由于相位恢复测量是一种根据图像来恢复镜面误差的间接测量方式,因而考察它的测量结果是否能够具有可靠性关键在于它能否准确的获取以上三方面的信息。

首先对于误差的位置,相位恢复测量可以通过设标记点的方法,对测量面形进行标定,以确定测量面形在镜面上的位置对应关系。对于误差的方向,实际上可以从衍射图上进行直观判断。因为镜面上的凹下的误差会使反射光束在焦点前汇聚,因而在前焦面形成局部亮点,而在后焦面形成局部暗点。同样,凸起的误差会使反射光束在焦点后汇聚,因而在后焦面形成局部亮点,而在前焦面形成局部暗点。这一规律的形成是因为镜面的高低起伏改变了反射光束在局部的曲率半径,造成了不同的局部汇聚点。因此可以从衍射图像直接验证测量面形误差的方向。例如图 3 中的镜面中心部分是一个凹坑,坑的中间有一小的凸起,因而这部分光束在前焦面形成局部亮环和中心暗点,如图 3(a),相反在后焦面形成局部暗环和中心亮点,如图 3(b)。

在确定了误差位置和方向后,误差大小的测量包括两方面:一是测量的准确度;二是测量的量程范围。对于测量的准确度,首先相关的是上面讨论的各

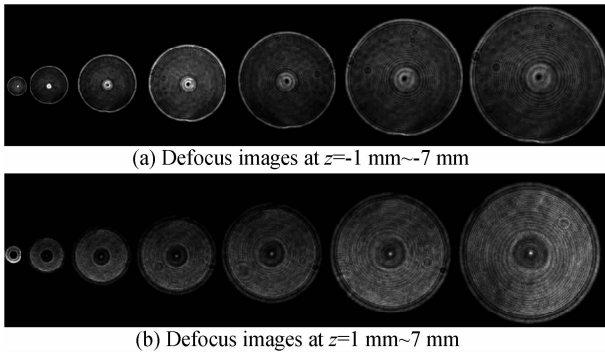


图3 焦点前后衍射图像

Fig. 3 Diffraction images around the focus

类误差因素,另外还要看图像是否能够提供足够的信息来唯一的确定面形误差.关于相位恢复的唯一性前人已有过理论上的研究^[9].从实际应用角度上讲,要想确保测量结果的唯一性必须尽可能充分地获取衍射图像,而且图像要分布在焦点前后.但由于CCD观测空间有限,图像获取不宜过多,因为那样会造成图像之间的距离较近,相似度增加,进而增加了不必要的冗余数据以及计算处理负担.对于不同的被测镜,要选取有利的离焦位置^[10].为了优化离焦位置的选取,建议采用仿真的方法进行考察.采用几组已知的相位面形数据作为理想面形,在相应的离焦位置上计算产生图像,再利用这些图像来恢复计算面形,看算法能否在一定的迭代次数内恢复出正确相位面形.这里所谓的“正确相位面形”可定义为与理想面形之间的误差PV值小于0.01波长(即上述0.15波长测量准确度的十分之一以下)的面形,此时可认为离焦参数的选取是正确的,计算收敛误差可以忽略.

相位恢复测量的量程范围与CCD的线性工作范围和相位恢复算法的设置,以及误差面形陡度等多种因素相关.这是因为大而且陡度高的误差容易造成光场能量集中而使CCD饱和.同时要准确恢复出大的镜面误差,需要更长计算时间和更优化的算法设置.而对于现有的镜面加工工艺而言,当镜面抛光后(进入光学检测阶段),主要以PV值在4~6个波长以下缓变误差为主.通过对算法的仿真结合实验验证表明,现有相位恢复系统是可以达到这一量程范围的.当误差大量超过这一范围时,测量系统可能只能得到误差的位置和方向,提供定性的测量结果.要想进一步提高系统的有效量程,一方面要提高设备性能,另一方面还要有针对性的设计相位恢复算法,这里就不再展开论述了.

4 球面镜测量实验

测量实验的目的—是为了验证测量方法的可行性和有效性,二是研究测量参量的变化对测量结果

的影响.被测对象为一面口径 $\phi 430$ mm、曲率半径1 000 mm的球面反射镜.被测镜经研磨抛光加工,其面形误差分布用Zygo干涉仪检测得到,如图4.图4(a)为二维面形图,(b)为截线上误差分布.镜面面形经去倾斜离焦处理后,准确度为PV 0.831 λ 、RMS 0.143 λ , λ 为632.8 nm.

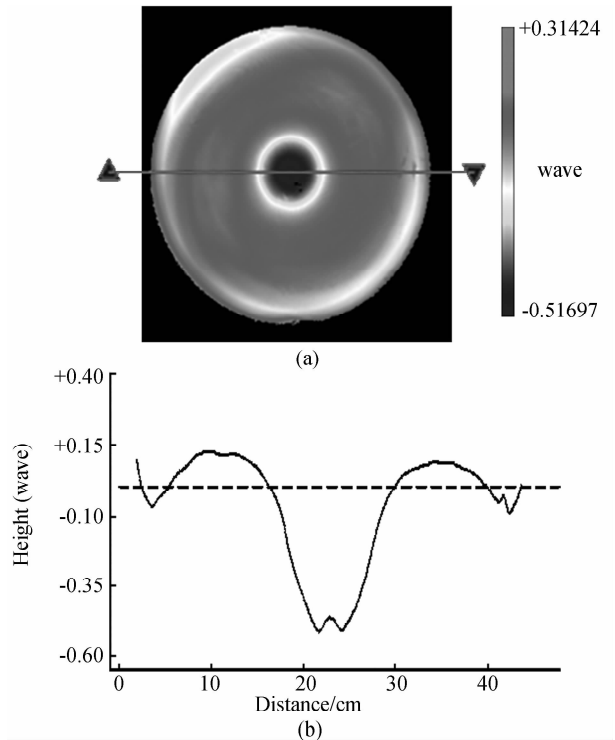


图4 被测镜Zygo干涉仪检测结果

Fig. 4 Testing result of interferometer

相位恢复测量装置采用的CCD为德国AVT CCD相机,256级灰度,阵列大小为 4.1×4.1 mm².光源为632.8 nm波长氦氖激光.CCD移动平台可以使CCD沿光传播方向移动和角度姿态微调,移动准确度为 ± 5 μ m.在进行相位恢复测量时,测量装置和被测镜不作任何隔振动处理,环境条件与加工时相同.

进行相位恢复测量时,首先将光源至于镜面顶点曲率半径处.然后将CCD相机的像元靶面置于焦点附近,寻找最佳聚焦点作为焦点.然后将CCD前后移动,选取拍摄光强图像.离焦图像的选取包括确定图片采样的空间范围、确定每张图像之间的距离(也就是图像采样间隔)以及确定图片的个数.

在确定图片采样的空间范围时,考虑到CCD阵列面尺寸有限,因而不能在离焦点太远的位置上拍摄,而且距离焦点太远的图像强度变化小,图像对比度差,波面误差在图像上反映不明显.同时,又不能取太接近焦点的图像,因为离焦点很近的位置上光集中在较少的一些像元上,图像中包含的有效信息少,不利于相位恢复处理.

为了选取图像采样区域,先用 CCD,在允许范围内,从焦点前 9 mm 到焦点后 9 mm 的空间范围内每个 1 mm 取样,其中部分衍射图像如图 3,前焦面坐标 z 取负,后焦面取正. 根据这些图片的相似度和对比度,发现 $z = \pm 1$ mm 和 ± 2 mm 处的图像太小,不够清晰,局部特征不明显,而位置在 $z = \pm 6.0$ mm 以外的图像与 $z = \pm 6.0$ mm 处的图像相似性很大,且图像对比度变差,因而将采样图片的空间范围确定在焦点前后 3 mm~6 mm 范围内. 此范围以外的图像虽不参与优化迭代计算,但可以作为验证数据,检验计算结果的正确性.

为了研究不同图像采样的间隔及图像数量对相位恢复的影响,可应用不同的图像序列组合进行相位恢复计算. 每次计算时,将入射波面的位置取被测镜面定点所在位置. 计算时对镜面的采样分辨率为 256×256 . 运算在一台配置 AMD1.8G CPU 的 PC 机上进行,通过 1 000 次迭代循环,处理时间最长为 43 分钟,最后得到的面形误差全部去倾斜和离焦后统计计算结果,如表 1,其中光强误差 E 为计算光强与全部采样图像强度额误差.

表 1 不同图像组合下条件相位恢复计算处理结果

图像数量	图像位置/mm	PV	RMS	光强误差 E
8	$\pm 3, \pm 4, \pm 5, \pm 6$	0.773	0.125	0.061
4	$\pm 3, \pm 5$	0.748	0.115	0.083
4	$\pm 4, \pm 6$	0.752	0.121	0.087
2	± 3	1.353	0.235	0.231
2	± 5	1.441	0.251	0.228

由表 1 中前三行可以发现,在图像数量 4 张且间隔 2 mm 和图像数 8 张间隔 1 mm 的参量配置下,考虑到系统误差,相位恢复计算都可以取得较为满意的结果. 而表 1 中后两行采用 2 幅图像的计算结果,不论在何处采样,光强误差 E 明显偏大,相应的结果误差与干涉检验相比也有较大出入. 表 1 中的结果与仿真评估相符,说明在适当的范围内取 4 张以上的图像,同时保持图像之间的间隔不要太小,就能取得测量的成功.

为了进一步比较测量结果,任意选取并打印出表 1 中第二行参量配置下的相位恢复测量面形分布,如图 5(图 5(a)为二维面形,(b)为水平中心截线误差). 对比图 4,可看出相位恢复测量结果与干涉测量结果一致,考虑到系统本身含有的光源误差,说明相位恢复测量原理正确. 测量准确度能满足光学加工要求,是一种切实可行的测量方法.

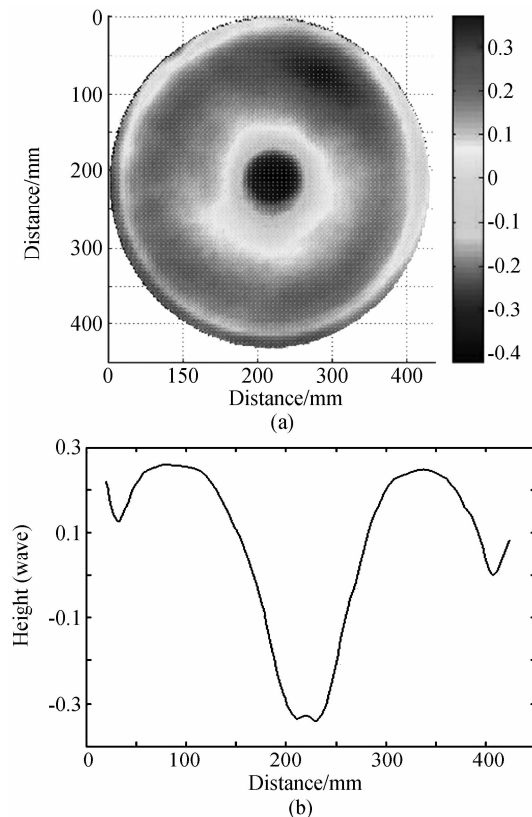


图 5 被测镜相位恢复测量结果

Fig. 5 Testing result of phase retrieval

5 结论

理论分析和实验验证都表明相位恢复技术能在大型光学镜面在位检测中发挥积极的作用. 此方法结构简单可实现性强,且性能稳定准确度高. 相位恢复测量给其它测量方法提供了一个相互验证的渠道,更加确保了测量的可靠性. 未来的研究将进一步提高此方法的测量准确度,扩大测量量程,使其工作范围更为宽泛.

参考文献

- [1] OHARA C M, FAUST J A, LOWMAN A E, *et al.* Phase retrieval camera optical testing of the advanced mirror system demonstrator[C]. *SPIE*, 2004, **5487**:1744-1756.
- [2] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction phase pictures [J]. *Optik*, 1972, **35**(2):237-246.
- [3] FIENUP J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl Opt*, 1982, **21**(15):2758-2769.
- [4] DENG Xiao-jiu, GAO Feng, LIU Cai-xia, *et al.* Non-paraxial approximation of scalar diffraction theory and its validity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6):898-901.
邓小玖, 高峰等, 刘彩霞, 等. 标量衍射理论的非傍轴近似及其有效性 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(6):898-901.

- [5] CHEN Lin-sen, SHAO Jie, WANG Xue-hui, *et al.* A new laser direct writing method of binary beam-shaping element [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 346-349.
陈林森, 邵洁, 王雪辉, 等. 一种二元整形元件激光直写方法的实验研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 346-349.
- [6] TAN Qiao-feng, WEI Xiao-feng. Diffractive optical element designed by YG algorithm for beam shaping in fractional fourier transform domain[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1724-1727.
谭峭峰, 魏晓峰. YG 算法设计分数傅里叶变换衍射光学光束整形器件[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1724-1727.
- [7] LI Jun-chang. Diffraction of laser and calculation on thermal acting[M]. Beijing: Science Press, 2002.
李俊昌. 激光的衍射和热作用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [8] SZIKLAS E A, SIEGMAN A E. Diffraction calculations using fast fourier transform methods[C]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, **62**(3): 410-412.
- [9] DEVANEY A J, CHILDLAW R. On the uniqueness question in the problem of phase retrieval from intensity measurement [J]. *JOSA A*, 1978, **68**(10): 1352-1354.
- [10] DEAN B H, BOWERS C W. Diversity selection for phase diverse phase retrieval[J]. *JOSA A*, 2003, **20**(8): 1490-1504.

Phase Retrieval on Site Testing for Large Mirrors

LI Sheng-yi, HU Xiao-jun, WU Yu-lie

(*Precise Engineering Laboratory, College of Mechatronics Engineering and Automation,*

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Received date: 2007-07-09

Abstract: To meet the requirement of on site testing in the manufacture of large mirror surfaces, a new method using phase retrieval technology was developed. A phase retrieval testing system based on the wave field at defocus was established together with the phase retrieval algorithm that serves the system. The testing system is simple and free from vibration, based on which, the error sources with testing precision and scope were analyzed in detail. The reliability for practical testing was also studied according to the requirement of on sit testing. The testing for a ball mirror of 430 mm aperture was carried out, where the affection from different testing configuration was also studied. The testing result showed high consistency compared with the result from interferometer. It shows that this method is feasible for high accuracy and suit for the requirement of polishing process.

Key words: Applied optics; Phase retrieval; Mirror surface testing; On-site testing