

文章编号: 1001-4322(2004)02-0137-04

微光学元件面形的数字刀口检测技术*

张 艳, 张蓉竹, 董 军, 张 均, 蔡邦维

(四川大学 光电科学技术系 四川 成都 610064)

摘 要: 微列阵光学元件的质量评价是光学测量中的一项新课题。将传统的刀口检测技术进行数字化改进后,用于微光学元件的面形检测,具有实时、定量、精度高的特点,在光学元件质量评价中有着重要意义。介绍了应用数字刀口检测反射式微镜列阵面形质量的原理和实验装置,详细论述了对 CCD 采集的阴影图进行图像处理的关键步骤(1)精确测定每个像素的暗场阈值所对应的刀口位置(2)确定与像素相应的面形区域的倾角误差(3)对面形进行重构。最后结合具体实验进行了分析和讨论,实验所测得的面形误差为 nm 量级。

关键词: 微镜列阵; 面形检测; 刀口检测; 数字化

中图分类号: TN247; TP211.6 文献标识码: A

随着微光学元件加工技术的发展,提出了对微小面形进行检测的要求。微透镜阵列的每个单元直径小,排列整齐,几何尺寸精度高,具有对光束准直、会聚、整形匀化、扩束、分束、变频和多通道成像等独特功能。微透镜阵列在二维光信息处理、光计算、光互连网络、多通道傅立叶变换以及航天、制导、高速检测、惯性约束聚变(ICF)驱动系统中均有重要的应用价值。

鉴于微透镜阵列的广泛应用及其精密的微加工工艺,对微光学元件面形质量的检测评价是一个重要的课题。检测光学元件面形质量的传统方法是干涉测量法,但是在微小尺寸的规则微透镜阵列上有不连续凹陷,使得干涉图案受到衍射效应的显著影响,从而影响干涉仪对微透镜阵列进行精确的面形测量。而表面轮廓仪等接触式测量,其空间分辨率受限于微探针的外形尺寸,并且探针划过被测表面时容易造成损伤,不宜用作微透镜阵列的面形测量^[1]。

对传统刀口检测技术进行数字化改进,将其用于微光学元件的面形检测,具有实时、定量、检测精度高的特点。本文对数字化刀口检测反射式微镜列阵面形质量的原理,试验装置,图像处理方法进行了详细论述,并结合具体实验进行了分析讨论。

1 测量原理

检测原理如图 1 所示,以测试表面所在平面作为参考平面建立坐标系 (X, Y, Z) ,以透镜 L (焦距为 f) 的焦平面 F 作为观察平面 (x, y, z) 。光源 s 位于焦平面 F 上,在被测表面形成自准直光束,从被测表面反射回来的光束聚焦在焦平面 F 。被测表面的局部倾斜误差决定了反射光线在观察平面的位置 (x, y) 。假设在光轴上方,被测表面平行于标准平面,从 T 点反射的光经透镜 L 后会聚于 t 点;在光轴下方,被测表面有一个局部变形,产生了一个相对于标准平面的倾斜角 α ,使从 U 点反射的光不再会聚于 t 点而是会聚于 u 点。若认为被测表面在 T 点处没有倾斜,则可以固定 t 点为原点。在几何光线反射模型下,在观察平面,当刀口平行 y 轴方向,沿 x 轴切割时,在假设倾斜角 α 很小的情况下,测得 u 点相对于 t 点的距离 x_0 ,可得^[2]

$$2\alpha_x = \arctan(x_0/f) \approx x_0/f \quad (1)$$

同理,当刀口平行于 x 轴,沿着 y 轴方向切割弥散斑时,可以得到类似的关于 α_y 与 y_0 和焦距 f 的关系式。

2 实验装置

测试装置如图 2 所示。设计中考虑了以下因素:为了避免在光路中形成干涉,采用非相干光源照明;从光源发出的光经过狭缝和限束器(狭缝位于透镜 L_1 的两倍焦距处),使得进入透镜 L_1 的光束更集中,提高观察

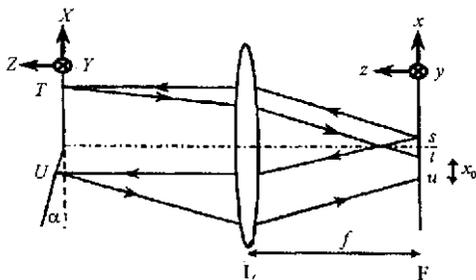


Fig. 1 Principle of the test

图 1 检测原理

* 收稿日期 2003-03-25; 修订日期 2003-09-18

作者简介:张 艳(1977—),女,硕士,现主要从事精密光学检测技术研究, E-mail: Eileen_zy001@sohu.com.

图像的亮度,光线经棱镜分束器、双胶合透镜 L_2 , 到达微镜阵列并反射, 刀口仪安置在双胶合透镜 L_2 的焦平面 F 处进行动态切割; 刀口仪与步进电机相连, 步进电机根据计算机指令可实时地调整刀口切割的步长, 提高了刀口移动距离的精确度; 同时, 将 CCD 连续记录的刀口动态切割过程中所形成的一系列阴影图输入计算机, 以供计算机进行实时图像处理。

在装置设计中, 采用双胶合透镜来代替普通的物镜, 是因为它相对显微物镜具有以下显著优点: (1) 通常显微物镜焦距较短, 而双胶合透镜焦距长, 能够提供足够长的工作距离以便于安置刀口进行操作; (2) 在实验中要求被检测的微镜阵列和刀口都处在透镜的焦平面上, 所以采用双胶合透镜来形成自准直; (3) 双胶合透镜是由一个正透镜和一个负透镜构成, 本身可以消除一部分像差。

3 图像处理流程

对 CCD 采集的刀口阴影图进行数字图像处理, 克服了在传统的刀口检测技术中由人眼直接观察阴影图所造成的客观性差, 不能定量, 精度低等缺点。这一过程是先进刀口检测技术获得高精度数字化测试结果的关键, 主要分为以下步骤。

3.1 精确测定每个像素的暗场阈值所对应的刀口位置

由刀口检测原理^[3]可知, 当用一个位于凹球面焦点处的理想点光源去检测标准凹面镜时, 会在该标准凹面镜的焦点处形成一个与光源共轭的像点, 用刀口去切割这个理想的像点时, 刀口后面的视场会顿时变暗。在这种理想情况下, 刀口的切割过程在光强与刀口位置的关系图中表现为一个阶跃形函数, 如图 3 所示, 这个阶跃所对应的刀口位置恰恰对应于像素的暗场阈值。

但在实际中, 由于光源、被检面形的非理想性, 使得经自准直光路所成像为一个有大小的光斑, 当刀口切割时, CCD 上的每个像素都有一个逐渐变暗的过程, 此时光强与刀口位置的关系图不再是一个理想的阶跃。因此, 不能通过 CCD 所记录的一幅图像直接确定像素的暗场阈值所对应的刀口位置。

当刀口步进式地沿 x 轴方向动态切割弥散斑时, CCD 依次连续采集相应图像(20~30幅), 这一系列图像, 可反映出 CCD 上每一个像素的灰度随刀口位置的变化关系, 如图 3 所示。在扣除了 CCD 的背景噪声之后, 可以认为像素的暗场阈值为

$$I_0 = (I_{\max} + I_{\min})/2 \quad (2)$$

根据暗场阈值的定义式(2)和图 3 所示的变化趋势, 我们选择 Boltzmann 模型对实验测量值进行曲线拟合, 准确求出 x_0 的值

$$I = I_2 + \frac{I_1 - I_2}{1 + \exp[(x - x_0)/dx]} \quad (3)$$

式中 I_1 为“S”型曲线的上渐近线的纵坐标值, 表示刀

口开始切割时像素的灰度值; I_2 为“S”型曲线的下渐近线的纵坐标值, 表示刀口完全切割后像素的灰度值; dx 为拟合曲线穿过其上下渐近线的部分所对应的 x 坐标的域宽, 表示灰度值 I 随着刀口位置 x 急剧变化区域的宽度; x_0 为由(2)式所确定的暗场阈值 I_0 所对应的刀口位置。

实际上, CCD 上所有的像素都可以得到一条与如图 3 所示的相似的曲线, 当刀口沿着 x 方向切割时, 进而可以确定所有像素各自的暗场阈值所对应的刀口位置 x_0 。同理, 当刀口沿着 y 方向切割时, 利用 CCD 上所记录的一系列阴影图可以准确地测定所有像素各自的暗场阈值所对应的刀口位置 y_0 。

3.2 确定与像素相应的面形区域的倾角误差

由于 CCD 所记录图像上的每一个像素均对应于被检测元件的一个面形单元, 利用(3)式可以精确测定每一个像素的黑暗阈值所对应的刀口位置 x_0 , 将此 x_0 值代入(1)式中就得到该被检测面形单元的倾角误差 α 。这样, 通过连续采集的 20~30 幅灰度图, 就可以得到被检元件上所有面形单元的在 X 方向的倾角图。这张倾

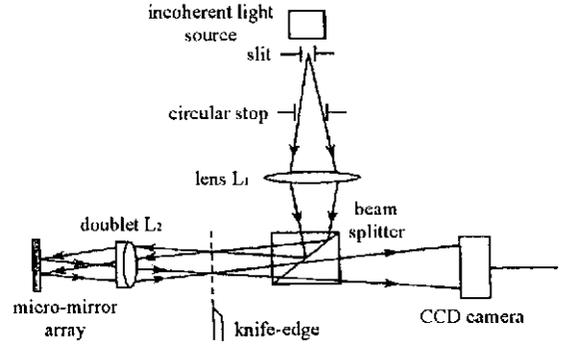


Fig. 2 Experimental setup of the test

图 2 试验装置

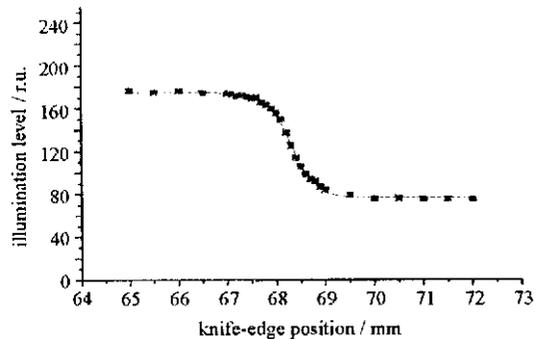


Fig. 3 Illumination of a pixel responding to the position of moving knife-edge

图 3 像素的灰度与刀口位置的关系图

角图实际上就反映了被检测元件的面形质量,只是不够直观,还需作进一步处理。

3.3 面形的重构

通过上一步骤得到的倾角误差图,常常呈一定规律的周期性分布。这一系列分布既反映了微镜列阵中微镜单元的大致形状,又反映了微镜面形的细小差异。不同微结构的微镜列阵所得到的倾角分布是不一样的,只有结合确定的倾角分布才能进行具体的分析。

在已知倾角分布 $Z'(X)$ 的情况下,可以通过倾斜函数进行积分实现微镜的面形重构。在镜面上 X 位置的表面凹陷可以由(4)式求出

$$Z(X) = \int_{X_1}^X [Z'(X) - Z'_0] dX + C \tag{4}$$

式中 $Z'(X)$ 为所选区域的倾角分布函数; Z'_0 为该区域面形相对于列阵基底的平均倾斜; C 为待定常数,选择适当的 C 值可以使得每一个微镜具有相等的顶点; X_1 是每一个微镜的开始测量位置。

由(4)式求出的表面凹陷只反映了一维的(x 方向的)倾斜,不能全面反映实际的面形质量。采用图4所示的“V”字型刀口^[4],可以沿两个相互垂直的方向 X 与 Y 去切割弥散斑,这样所得到的一系列阴影图就分别反映了被检测面形沿 X 与 Y 两个相互垂直方向的倾角误差。进而,对这两个垂直方向的面形信息进行积分就可恢复出完整的三维面形图。

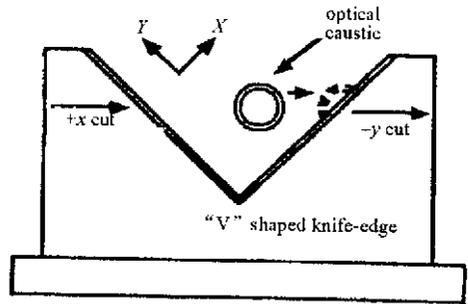


Fig. 4 “V” shaped knife-edge

图4 “V”字型刀口

4 实验验证

为了验证此方法的正确性,我们对一微透镜阵列(每个单元均为口径 $103\mu\text{m}$ 、高度 12nm 的旋转抛物面)进行了研究。由于需处理的数据量较大,本文只选用了对其中一个单元在 x 方向上一个纵切片的图像处理过程来进行验证说明。

首先,通过实验采集了该单元在不同刀口切割位置所得的阴影图(共30幅),然后利用 matlab 工具箱中的 imread 命令读出每幅图像的灰度数据。对该单元中的每个像素,利用 Boltzman 曲线拟合公式(3)求出 x_0 对应的黑暗阈值(如图5所示)。

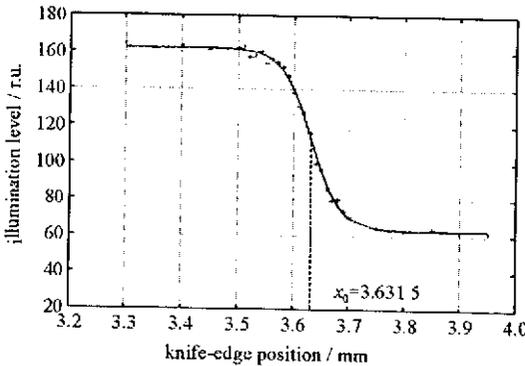


Fig. 5 the result of Boltzman curve fit

图5 Boltzman 曲线拟合结果

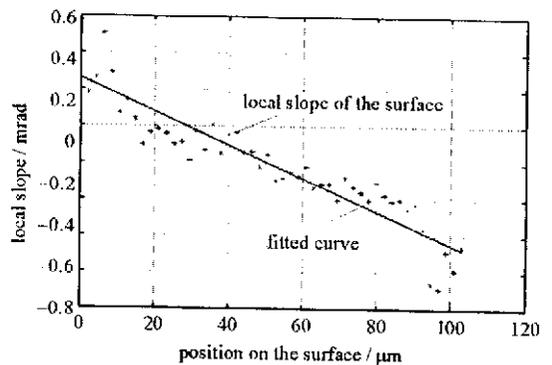


Fig. 6 Location of local slope

图6 局部倾斜分布图

我们对这个切片上所有像素的黑暗阈值进行了修正,校正了因刀口切割所带来的离轴误差,再将 x_0 代入公式(1),即可以求出该透镜单元的一个纵切片上的倾角分布,如图6所示。由图6可以看出,这些倾角大致呈线性分布,经最小二乘拟合后可得其线性分布的方程 $y = -0.0091x + 0.4627$ (其中 y 表示切片上与每个像素所对应被检面形单元的局部倾角(单位为 mrad), x 表示与每个像素所对应的切片上的位置(单位为 μm)),这说明被检表面的这一切片近似为抛物线。

事实上,将这些倾角代入公式(4),令初始位置 $x_1 = 0$ (即把初始位置 x_1 作为基准,认为此处相对于参考平面无倾斜),并且为了简化计算可假定 $Z'_0 = 0$ (即认为被检区域相对于参考平面整体无倾斜,实际工作中可具体

计算出 Z'_0 的值), 然后进行数值积分就可以得到与每个像素所对应的被检切片单元上的高度, 从而可以恢复出这一纵切面的实际形状。将之与其理论计算结果相比较, 便可以得出实际面形与理想面形之间的误差曲线。由图 6 中各点所恢复出的实验切片的形状如图 7 中实线所示, 而由理论计算出的切面方程为 $h = -0.0045x^2 + 0.4665x$ (其中 h 表示每个像素所对应切片单元的高度(单位为 nm), 其图形如图 7 中虚线所示, 而底部的实线则代表了实测面形和理论计算面形之间的误差曲线。对于每个微透镜单元, 只需知道其在 x 和 y 方向上每个切面的误差大小, 便可以得出整个单元实际面形和理想面形之间的误差范围。可以看出, 实验所测得的面形误差能够精确到 2nm 以内。

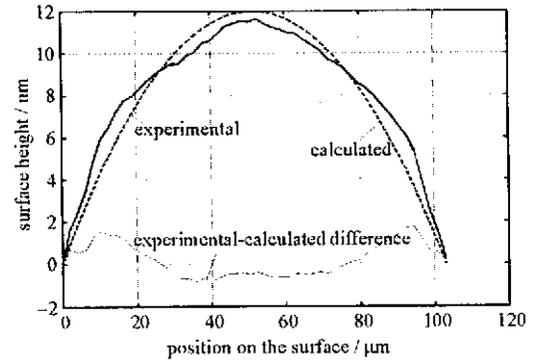


Fig. 7 Reconstructed surface, theoretical surface and their difference for a parabolic micro-mirror

图 7 微抛物镜面的重构表面和理想表面及其相应误差

5 小 结

本文所介绍的改进的刀口检测技术, 具有实时、定量、精度高的特点, 实验证明所测得的面形误差可精确到 nm 量级。这表明用数字刀口检测技术检测微光学元件的检测精度与原子力显微镜的检测精度相当^[5], 从而证实了该技术的正确性并表明它还可以作为传统光学元件的粗糙度的检测方法。

参考文献:

- [1] 许乔, 叶钧, 包正康, 等. 热熔微透镜阵列的综合性能测试[J]. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 125—128. (Xu Q, Ye J, Bao Z K, et al. Measurement of refractive microlens array. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1996, 17(1): 125—128)
- [2] Zamkotsian F, Dohlen K, Lanzoni P, et al. Knife-edge test for characterization of sub-nanometer deformations in micro-optical surfaces[A]. SPIE [C]. 1999, 3782 : 328—336.
- [3] 马拉卡拉 D. 光学车间检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983. 205—223. (Malacara D. Optical shop testing. Beijing: China Machine Press, 1983. 205—223)
- [4] Vandenberg D E, Humbel W D, Wertheimer A. Quantitative evaluation of optical surfaces using an improved Foucault test approach[A]. SPIE [C]. 1991, 1542 : 534—542.
- [5] 张亦奕, 贺节, 商广义, 等. 原子力显微镜[J]. 光学学报, 1995, 15(1): 112—116. (Zhang Y Y, He J, Shang G Y, et al. An atomic force microscope. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(1): 112—116)
- [6] 袁吕军. 刀口定量检验技术的研究[J]. 光学学报, 1999, 19(6): 845—851. (Yuan L J. Study of technology for knife-edge quantitative test. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(6): 845—851)

Digital knife-edge testing technology on micro-optical surface characterization

ZHANG Yan, ZHANG Rong-zhu, DONG Jun, ZHANG Jun, CAI Bang-wei

(Opto-electronics Science and Technology Department, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The evaluation of micro-array optical components is a new task in the field of optical test. The improved Foucault knife-edge test technology has many advantages as real time, digital, precision, etc. This paper introduces the principle and the experimental set-up of knife-edge digital test of the surface characterization of micro-mirror array, and describes the key steps in processing the images of the micro-mirrors recorded by the CCD detector as: (1) precisely determine the knife-edge position correspond to the darkness threshold of every pixel; (2) determine the slope error of the surface area correspond to the given pixels; (3) reconstruct the examined surface. Furthermore, it also presents some elementary experimental results that the surface error is up to nm level.

Keywords: Micro-mirror array; Surface characterization test; Knife-edge test; Digital