

文章编号: 0258-7025(2008)10-1548-05

# 一种区域搜索获取平面光学元件光圈数的方法

江晓军<sup>1,2</sup> 黄惠杰<sup>1</sup> 王向朝<sup>1</sup> 曾爱军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 提出一种获取平面光学元件光圈数的方法。通过确定一幅干涉条纹图像中三块测试区域及相应的搜索区域, 寻找条纹弯曲量的平均值和相应条纹间距的平均值, 根据测试区域对应的权重系数, 得到被测平面光学元件光圈数的最佳估计值。通过测量标准光圈并比较目视判读结果, 得到最大相对误差为 5%。实验结果表明, 该方法提高了处理干涉条纹图像的适应性, 并可替代人工目视判读干涉条纹图像。

**关键词** 光学检测; 数字图像处理; 条纹分析; 检测; 加权平均

**中图分类号** TN 911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1548

## Obtaining the Value of Light Ring of the Plane Optical Element by the Zone Search Method

Jiang Xiaojun<sup>1,2</sup> Huang Huijie<sup>1</sup> Wang Xiangzhao<sup>1</sup> Zeng Aijun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** A method for obtaining the value of light ring of the plane optical element is presented. Three tested zones and searching zones in the interferogram are determined to search the average curvature of the interference fringes and the average fringe spacing, and the optimum estimation value of light ring of the plane optical element is obtained by using the weight coefficients of the tested zones. By measuring the standard optical elements and comparing with the visual interpretation results of interference fringes, the maximum relative error of 5% is obtained. Experimental results show that the method can be utilized to improve the adaptation capability of processing interferograms and substitute the visual interpretation of interference fringes.

**Key words** optical test; digital image processing; fringe analysis; detection; weighted average

## 1 引言

为了更好地了解所加工的光学元件的面形情况, 可以通过处理干涉条纹图像获取光学元件的面形信息<sup>[1~5]</sup>。目前, 获取光学元件面形信息的方法主要有三种: 使用数字相移式干涉仪可以得到一些表征平面光学元件面形质量的参数, 但这种仪器价格昂贵, 且要求的工作环境较为苛刻, 难以被推广应用于生产车间<sup>[6~8]</sup>; 人工判读法虽然可满足生产车间的低成本要求, 但过程繁琐且容易出错使其应用受到极大的限制; 目视判读法可以获得平面光学元

件的光圈数, 但其测量结果受不同目视判读者的影响较大, 有时不同目视判读者对同一幅干涉条纹图像的判读结果会有较大的差异。以上的情况均给实际生产过程中光学元件的高精度加工带来了困难<sup>[9]</sup>。而应用计算机改善人工判读的方法具有成本低和要求的工作环境较宽松等特点, 将成为获取平面光学元件面形信息的一种较有前途的方法。

本文提出了一种获取平面光学元件光圈数的方法, 是在平面光学元件具有较好面形的情况下, 使用互补性氧化金属半导体 (CMOS) 摄像机获得一幅干

收稿日期: 2008-01-14; 收到修改稿日期: 2008-02-28

基金项目: 上海市青年科技启明星计划 (06QB14047) 资助项目。

作者简介: 江晓军 (1970—), 男, 四川人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事精密光电测量和检测技术方面的研究。

E-mail: xiaojunj@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝 (1957—), 男, 辽宁人, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

涉条纹图像,再由计算机对该图像进行处理。这种方法克服了目前平面光学元件光圈数的测量方法的不足,有效地获取了平面光学元件的光圈数。

## 2 实验装置

图 1 所示为实验装置图,其中 He-Ne 激光器使用的光源波长  $\lambda_1$  为 632.8 nm,它发出的光束经过小球透镜聚焦后出射,再经过一对偏振片时,由偏振片对它的光强进行调节。离开偏振片的光束被转向棱镜反射到参考镜形成准直光束。当光束经过参考镜的参考面时,被分成两个部分,其中一部分光束被反射而形成参考光,另一部分光束由被测光学元件的表面返回时携带该面形的信息。这两束光相遇形成干涉光后,被转向棱镜反射至反射镜,再由反射镜进行反射。反射光束经过透镜聚焦成像在 CMOS 摄像机的光敏面上,由摄像机采集图像并将图像数据送至计算机,再进行窗口滤波、二值化、条纹追迹和条纹标识等预处理,最后在不同区域进行搜索以获取平面光学元件的光圈数。

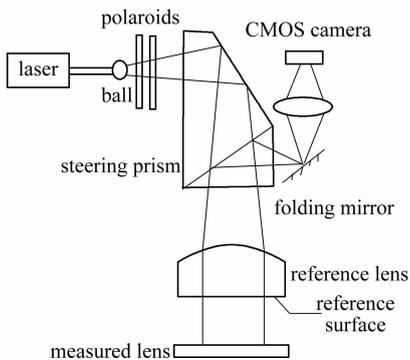


图 1 测量平面光学元件面形的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for surface profile measurement

## 3 测量方法

用计算机实现人工工作图法,其获取光学元件光圈数的示意图如图 2 所示。条纹中心线的两端点连线与水平线相交于一点,且该条纹中心线与水平线相交于另一点,此时两点间的距离为条纹弯曲量。根据一幅干涉条纹图像,先取整体图像作为测试区域,找到各干涉条纹的中心线,然后计算通过直径方向上干涉条纹的弯曲量  $h$  相对于条纹的间距  $H$  的比值,就可得到其表征光学元件面形质量 - 光圈数<sup>[10]</sup>。但在实际应用中发现,由于环境中存在噪声和光学元件的影响,使得通过干涉仪获得的图像包

含不规则的干涉条纹,且在图像边界上出现不规则和缺失现象。当仍然取整个图像作为测试区域时,不能准确找到通过直径方向上干涉条纹的弯曲量  $h$  及条纹的间距  $H$ ,从而极大地影响了对光学元件面形的测量。

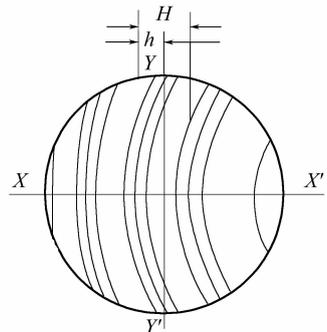


图 2 获取光学元件光圈数的原理图

Fig. 2 Schematic of obtaining the value of light ring of an optical element

本文提出的方法是在一幅干涉条纹图像中先选取一块较小的、近似与此图像同心的圆形区域作为测试区域,这个区域包含 3~5 条接近于垂直取向的干涉条纹,然后以这个区域总行数的 20% 作为搜索区域,并且这个搜索区域的中心位置在测试区域的直径方向上。设  $k$  为测试区域总行数,则以测试区域中心位置的水平线  $XX'$  上下各  $0.1k$  行的范围作为搜索区域。设在从上到下的方向上,平行于  $XX'$  线的水平线为第  $l_i$  条线 ( $i = 1, 2, \dots, 0.2k + 1$ ),通过第  $l_i$  条线的方向上的条纹最大弯曲量为  $h_i$ ,相应的条纹间距为  $H_i$ ,搜索区域中通过平行于  $XX'$  水平线方向上条纹弯曲量的平均值为  $h_p$ ,相应条纹间距的平均值为  $H_p$ ,则两者的比值为

$$N' = h_p / H_p = \frac{\sum_{i=1}^{0.2k+1} h_i}{\sum_{i=1}^{0.2k+1} H_i} \quad (1)$$

考虑到计算标准光圈数的参考波长  $\lambda_0$  为 546.1 nm,而实验中干涉仪使用的光源波长  $\lambda_1$  为 632.8 nm,得到使用波长为 632.8 nm 的光源进行测量时光学元件测试区域的  $N_x$ ,即

$$N_x = (\lambda_0 / \lambda_1) N' \quad (2)$$

在平面光学元件面形较好的情况下,光学元件测试区域的  $N_x$  与测试区域半径  $R$  的平方存在一定的函数关系<sup>[11]</sup>,即

$$N_x \propto R^2 \quad (3)$$

可根据(2),(3)式对  $N'$  值进行修正和换算<sup>[10]</sup>。当  $R$  作为整个图像测试区域的半径时,其相应光学元件的光圈数为  $N$ 。按上述方法,再对选择的测试区

域进行9次测量,得到9个测量结果,由这10次测量值可知其标准偏差为 $\sigma_1$ 。在选取上述小区域作为测试区域的基础上,将该区域按一定的比例进行扩大并将扩大后的圆形区域作为测试区域,然后用上述方法对该区域进行10次测试分析,得到其测量值的标准偏差为 $\sigma_2$ 。最后将第二次扩大的区域按一定比例进行扩大并将扩大后的圆形区域作为测试区域,用同样的方法对该区域进行10次测试分析,得到其标准偏差为 $\sigma_3$ 。

由于在三个不同大小的测试区域分别进行的测量可视为不等精度的测量,因而这三个测试区域在进行测量时具有不同的权。根据不同的权进行加权平均时,可将得到的加权算术平均值作为被测光圈数的最佳估计值。设在这三个区域上进行测量的相应权重系数为 $P_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ),可根据计算方便进行选取<sup>[12]</sup>

$$P_i = J/\sigma_i^2, \quad (4)$$

式中 $J$ 为一比例常数。设在一个测试区域上进行10次测量并换算,得到结果的算术平均值为 $N_i$ ,则计算得到的加权算术平均值 $\bar{N}$ 可作为光学元件的光圈数,即

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^{10} P_i N_i}{\sum_{i=1}^{10} P_i}. \quad (5)$$

## 4 实验及分析

使用两块实际生产过程中加工的、口径为 $\phi 150$  mm的平面光学元件作为被测量光学元件,并将它们分别编号为被测光学元件1,2,然后用图1所示的实验装置对它们分别进行测量。实验时将平面光学元件放在工作台上并静置一段时间后,调节工作台上的测微螺旋,可获得包含3~5条干涉条纹的图像。先将平面光学元件1置于工作台上,然后调节工作台,获得一幅包含3条干涉条纹的图像,并使这些干涉条纹保持在近似垂直的方向上。再由CMOS摄像机对该图像进行采集并送计算机进行存储,得到的图像大小为320 pixel $\times$ 240 pixel,其结果如图3(a)所示,可见图像中条纹出现了一定的不规则,即中间条纹较为弯曲,而其两边的条纹较为平直。当以同样的方法对被测光学元件2进行测量时,获得了一幅包含4条干涉条纹的图像,图像大小为320 pixel $\times$ 240 pixel,其结果如图3(b)所示,可见图像中条纹出现了一定的规则性,即4条条纹均向一个方向弯曲。

此外,由于噪声和光学元件的影响,图3在边界

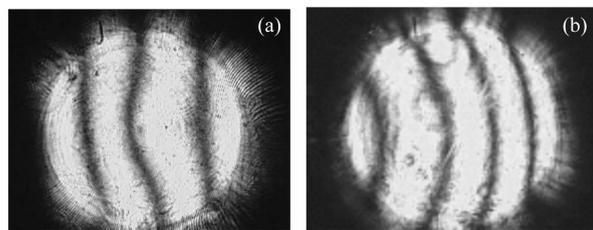


图3 平面光学元件的干涉图

上出现了不规则和缺失现象,其中图3(b)在边界上出现的不规则和缺失现象较为严重。同时,在图像的边界,噪声淹没了有用的干涉条纹信息。当计算机实现人工工作图法取整体图像作为测试区域进行测试时,由于不能准确找到通过直径方向上干涉条纹的弯曲量及条纹的间距,因而极大地影响了对光学元件面形的测量。

有经验的技术员应用目视判读法对图3中的干涉条纹进行了判读,其相应结果为1/3光圈和0.6光圈。应用本文提出的方法对图3(a)进行了测试。先选择约占整个图像面积的70%的区域作为测试区域,然后以该区域总行数的20%作为搜索区域寻找条纹弯曲量和相应条纹间距,再根据(1)式分别对条纹弯曲量的平均值和相应条纹间距的平均值进行计算并得到 $N'$ 值,最后根据(2)~(4)式对 $N'$ 值进行修正、换算和计算,得到第一次测试结果。用同样的方法对该区域进行9次测试,得到这10次测试结果的算术平均值为0.3136光圈,标准偏差为 $\pm 0.00417$ 。在选取上述测试区域的基础上,将该区域分别扩大14%和29%,并将它们作为测试区域进行测试,得到 $N_2$ 值, $\sigma_2$ 值, $N_3$ 值和 $\sigma_3$ 值,然后根据(5)式进行加权平均得到加权算术平均值 $\bar{N}$ 。采用同样的方法,对图3(b)进行了测试,得到的结果如表1所示。

表1 图3的测量结果  
Table 1 Test results of Fig. 3

|            | Fig. 3(a)     | Fig. 3(b)     |
|------------|---------------|---------------|
| $N_1$      | 0.3136        | 0.5725        |
| $\sigma_1$ | $\pm 0.00417$ | $\pm 0.0066$  |
| $P_1$      | 987           | 298           |
| $N_2$      | 0.3201        | 0.57777       |
| $\sigma_2$ | $\pm 0.00354$ | $\pm 0.00309$ |
| $P_2$      | 1374          | 1368          |
| $N_3$      | 0.3162        | 0.5854        |
| $\sigma_3$ | $\pm 0.00282$ | $\pm 0.0056$  |
| $P_3$      | 2175          | 414           |
| $\bar{N}$  | 0.3170        | 0.5784        |

从表 1 可见,采用条纹弯曲量的平均值和条纹间距的平均值的方法,可对不规则条纹和规则条纹进行有效处理。其中,对图 3(a)中较大测试区域进行测量得到的  $N_3$  值与  $\bar{N}$  值较为接近,而对图 3(b)的中等测试区域进行测量得到的  $N_2$  值与  $\bar{N}$  值较为接近。这是由于图 3(a)在边界上出现的不规则和缺失现象并不严重,较大区域的测试结果比较小区域的测试结果更好地反映了光学元件的光圈数。根据(4)式可知,测试区域对应的权重系数与标准偏差的平方成反比。图 3(a)中较大测试区域的标准偏差为  $\pm 0.00282$ ,它是三个测试区域的标准偏差中的最小值,但其对应的权重系数为最大值,加权平均得到的结果主要取决于该值。而图 3(b)在边界上出现的不规则和缺失现象较严重,较大区域接近图像的边界时,测量得到的标准偏差增大,从而使该测试区域的权重系数降低。图 3(b)的中等测试区域离图像边界较远,测量得到的标准偏差为  $\pm 0.00309$ ,该值是三个测试区域的标准偏差中的最小值,其对应的权重系数为最大,加权平均得到的结果与该区

域的测量值接近。

从表 1 还可见,应用本文的方法对图 3(a)和(b)的测量结果分别为 0.3170 光圈和 0.5784 光圈,与人工目视判读得到的结果之间的最大相对误差为 5%,表明本文提出的方法获取实际应用中的光学元件的光圈数与人工目视判读干涉条纹图像的结果较为接近,可替代人工目视判读干涉条纹图像。

图 4(a)~(c)所示为国家标准样板标准光圈,可见,图像边界上没有出现不规则和缺失现象,并且图中条纹均表现为一定的规则性。

应用本文的方法对图 4 进行测量,根据(2)式将测量值转换为 546.1 nm 波长下的光圈数,以便对结果分析。先选择约占整个图像面积的 70% 的区域作为测试区域进行测试,得到  $N_1$  值和  $\sigma_1$  值。然后在选取上述测试区域的基础上,将区域分别扩大 14% 和 29%,并将它们作为测试区域进行测试,得到  $N_2$  值,  $\sigma_2$  值,  $N_3$  值和  $\sigma_3$  值,然后根据(5)式进行加权平均,得到如表 2 所示结果。

从表 2 可见,各个测试区域的测量值与相应被

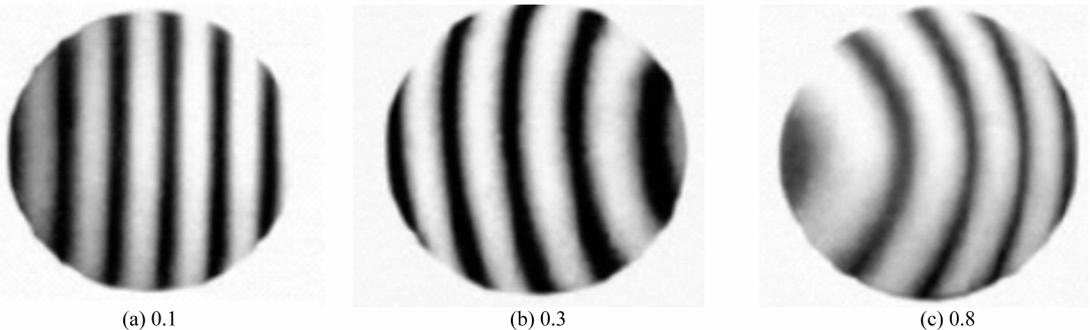


图 4 国家标准样板标准光圈

Fig. 4 Standard values of light ring of standard optical elements

表 2 图 4 的测量结果

Table 2 Test results of Fig. 4

|                    | Fig. 4(a)     | Fig. 4(b)     | Fig. 4(c)     |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| $N_1$              | 0.0959        | 0.2818        | 0.7638        |
| $\sigma_1$         | $\pm 0.0012$  | $\pm 0.00346$ | $\pm 0.00824$ |
| $N_2$              | 0.0959        | 0.2866        | 0.7664        |
| $\sigma_2$         | $\pm 0.0012$  | $\pm 0.00306$ | $\pm 0.00453$ |
| $N_3$              | 0.0966        | 0.2919        | 0.7755        |
| $\sigma_3$         | $\pm 0.00069$ | $\pm 0.00152$ | $\pm 0.00341$ |
| $\bar{N}$          | 0.0964        | 0.2896        | 0.771         |
| Relative error / % | 3.6           | 3.5           | 3.6           |

测标准光圈的相对误差小于 4%,表明采用条纹弯曲量平均值和条纹间距平均值的方法可对规则条纹进行有效处理。图 4(a)中三个测试区域的测试值均与  $\bar{N}$  值较接近,这是由于图像边界上没有出

现不规则和缺失现象,且条纹较平直。当选择三个不同测试区域时,条纹弯曲量的平均值基本一致,使测试区域对应的权重系数相差不大,因而三个测试区域的测试值较为接近。图 4(b),(c)较大测试区域的测试值与相应  $\bar{N}$  值较接近,这是由于随着测试区域的逐渐增大,其测试区域相应的标准偏差逐渐减小,使相应的权重系数逐渐增大,因而较大测试区域得到的  $N_3$  值与  $\bar{N}$  值较为接近。此外,对图 4 进行测试得到的测量结果与相应被测标准光圈的相对误差最大为 3.6%,表明用本文的方法获取平面光学元件的光圈数是可行的。

## 5 结 论

获取平面光学元件光圈数的方法是在平面光学

元件面形较好的情况下,在一幅干涉条纹图像中确定三块测试区域及相应的搜索区域,然后搜寻条纹弯曲量的平均值和相应条纹间距的平均值,最后根据测试区域对应的权重系数,得到被测平面光学元件光圈数的最佳估计值。实验结果表明,采用条纹弯曲量平均值和条纹间距平均值的技术可较好地处理规则或不规则的干涉条纹,提高对干涉条纹图像的适应性;通过对不同测试区域的测量值进行加权平均,较好地减小了干涉条纹图像边界不规则和缺失现象对于测量结果的影响,从而可替代人工目视判读干涉条纹图像,具有较强的实用性。

### 参 考 文 献

- Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chen. Measurement performance of simultaneous phase-shifting interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1682~1687  
左 芬,陈 磊,徐 晨. 同步移相干涉的测量性能[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1682~1687
- Guo Haitao, Tian Tan, Wang Lianyu *et al.*. Image segmentation using the maximum entropy of the two-dimensional bound histogram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):506~509  
郭海涛,田 坦,王连玉等. 利用二维属性直方图的最大熵的图像分割方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):506~509
- Zhu Yongjian, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):667~672  
朱勇建,刘立人,栾 竹等. 相位解包裹算法中基于调制度的新质量图[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):667~672
- Falih H. Ahmad, Vlad F. Lozovskiy, Ray M. Castellane. Interferometric phase estimation through a feedback loop technique [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **251**:51~58
- Abhijit Patil, Pramod Rastogi. Approaches in generalized phase shifting interferometry [J]. *Opt. and Lasers in Eng.*, 2005, **43**:475~490
- Sanjib Chatterjee. Measurement of surface figure of plane optical surfaces using Fizeau interferometer with wedge phase shifter [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2004, **37**:43~49
- Sanjib Chatterjee, Y. Pawan Kumar, Basanta Bhaduri. Measurement of surface figure of plane optical surfaces with polarization phase-shifting Fizeau interferometer [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**:268~274
- M. de Angelis, S. De Nicola, P. Ferraro *et al.*. Profile measurement of a one-dimensional phase boundary sample using a single shot phase-step method [J]. *Opt. and Lasers in Eng.*, 2005, **43**:1305~1314
- Zhu Rihong, Chen Lei, Wang Qing *et al.*. Phase-shift interferometry and its application [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(2):85~88  
朱日宏,陈 磊,王 青等. 移相干涉测量术及其应用[J]. *应用光学*, 2006, **27**(2):85~88
- Surface form deviation of optical elements-inspection methods [S]. GB 2831-81, 1982  
光学零件的面形偏差,检验方法(光圈识别)[S]. 中华人民共和国国家标准 GB 2831-81, 1982
- Piao Chenghao, Gao Wenxin, Cai Li. Precision analysis of precisely grinding machining machine for locus shaping method [J]. *Optical Technology*, 1999, (1):54~57  
朴承镐,高文信,蔡 立. 轨迹成型法精密磨削加工机床的精度分析[J]. *光学技术*, 1999, (1):54~57
- Mao Yingtai. Error Theory and the Precision Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. 18~136  
毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京:国防工业出版社, 1982. 18~136