

doi: 10.3788/gzxb20124110.1180

# 双光路成像干涉定心系统设计

方超, 向阳

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

**摘 要:**在光刻投影物镜镜片加工和装配时, 为了满足磨边定心和装配定心阶段对镜片测量的量程、灵敏度和准确度不同的需求, 本文提出了一种双光路准直成像复合干涉的定心方法, 采用同一光路实现准直和干涉两种不同的测量方法, 分别针对磨边定心和装配定心的测量需要. 根据实际需要设计了测量系统的参量, 根据该参量对系统的测量范围、灵敏度和准确度进行了理论分析. 结果表明: 该系统在准直测量阶段的测量范围从  $1\ \mu\text{m}$  到  $500\ \mu\text{m}$ , 测量灵敏度最高为  $0.2\%$ , 测量准确度为  $1.02\ \mu\text{m}$ ; 在干涉测量阶段的测量范围从  $0.01\ \mu\text{m}$  到  $1.9\ \mu\text{m}$ , 测量灵敏度最低为  $0.1\%$ , 测量准确度达到  $0.2\ \mu\text{m}$ , 可以满足在磨边定心阶段大量程、低灵敏度、低准确度以及装配定心阶段小量程、高灵敏度、高准确度的定心要求. 采用双光路成像干涉原理的定心系统满足了设计需求, 可指导光刻投影物镜等高准确度物镜的生产和装调.

**关键词:**测量; 准直测量; 干涉测量; 双光路

**中图分类号:** O435; O436      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)10-1180-6

## 0 引言

近年来, 随着半导体产业的发展, 投影光刻技术对投影光刻镜头成像质量的要求也越来越高<sup>[1-3]</sup>. 系统装配是研究和生产投影光刻镜头的最后步骤, 也是保证其成像质量的重要步骤之一. 中心偏差是系统装配时需要着重控制的关键参量, 指的是镜片的光轴与参考轴间的偏差, 它的存在破坏了光学系统的共轴性, 引起系统的彗差<sup>[4-5]</sup>, 并导致成像的像散性和畸变的不对称性<sup>[6-7]</sup>, 从而降低了成像质量. 如何提高光刻物镜中心偏差的测量和调整准确度, 实现系统高准确度定心是研制投影光刻镜头时的重要问题.

研究生产投影光刻物镜需要经历磨边定心, 装配定心等阶段. 每阶段对中心偏差的测量要求均不相同: 在磨边定心阶段, 需要大的测量范围, 较低的测量灵敏度保证效率, 同时测量准确度要求相对较低; 而在装配定心阶段, 则需要的测量范围较小, 较高的灵敏度保证调整准确度, 还需要较高的测量准确度. 目前常用的定心设备普遍采用单光路反射式测量法<sup>[8-10]</sup>. 这种方法需要依次测量各面中心偏差的合成值, 再通过逐次迭代求解每一面的中心偏差, 因此后测量面的准确度总是受前测量面测量准确度

的影响, 造成误差的累积效应.

本文提出了一种双光路成像干涉的镜片定心方法, 采用同一基准参考轴系, 通过准直成像和干涉测量分别满足大量程、低灵敏度、低准确度以及小量程、高灵敏度、高准确度的测量要求; 同时使用双光路代替单光路, 解决中心偏差测量中的误差累积问题.

## 1 测量原理

双光路成像干涉定心法使用双测量光路代替传统的单测量光路, 在磨边定心阶段采用准直成像测量实现大量程、低灵敏度、低准确度的粗调; 装配定心阶段, 采用干涉测量实现小量程、高灵敏度、高准确度测量精调. 两个测量阶段复用测量光路, 并使用同一基准参考轴系.

### 1.1 准直成像法测量原理

磨边定心阶段采用准直成像法对镜片中心偏差进行粗测, 其原理如图 1 所示. 光源发出的光经过针孔 1 和准直透镜 2 形成平行光, 该平行光束通过分束器 3 和透镜 4 在测量方向上会聚在被测面的球心. 被测面的反射光经透镜 4 和分束器 3 后, 由透镜 6 成像在 CCD7 上. 被测镜片被固定在高准确度转台上, 当它转动时, 测量光斑轨迹形成一个圆<sup>[11]</sup>. 整个测量系统采用高准确度转台的转动轴作为测量基准, 测量前将测量系统的光轴调节至与转动轴重合

基金项目: 02 重大科技专项 (No. 2009ZX02005) 资助

第一作者: 方超 (1985-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为信息光学及光学测量. Email: ciompfangchao@126.com

收稿日期: 2012-05-25; 修回日期: 2012-07-30

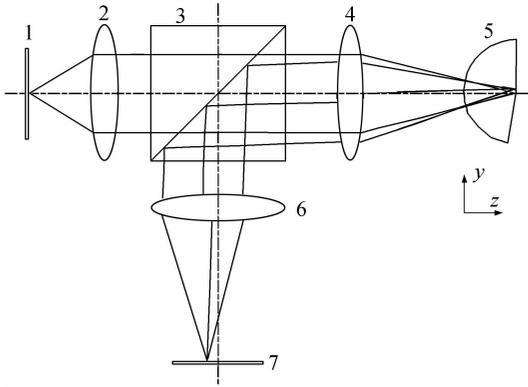


图1 准直成像法的测量原理

Fig.1 The measuring principles by using collimation

位置. 被测面球心距转动参考轴的中心偏差表示为  $\Delta_1$ , 则

$$\Delta_1 = r f_1 / 2 f_2 \quad (1)$$

式中,  $r$  为测量光斑形成轨迹圆的半径,  $f_1$ 、 $f_2$  分别为透镜 4 和透镜 6 的焦距.

### 1.2 干涉法测量原理

用于装配定心阶段的干涉法测量原理如图 2 所示: 相干光源 1 经过准直透镜 2 被分束器 3 分为两束, 一束被反射镜 8 反射, 后依次经过分束器 3、透镜 6 和透镜 7 形成参考光; 另一束进过透镜 4 经过被测透镜 5 的被测面反射后, 再依次通过透镜 4、透镜 6 和透镜 7 形成测量光束. 其中被测透镜 5 的被测面在透镜 4 的焦点上, 透镜 6 的像方焦点在透镜 7 的物方焦点上. 干涉测量同样采用高精度转台的转动轴作为测量基准轴, 整个系统的光轴以这个基准进行调节.

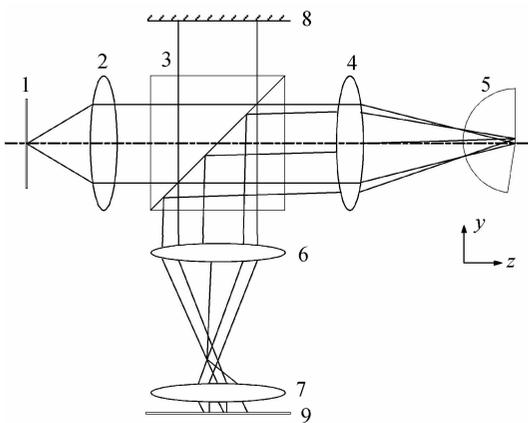


图2 干涉测量法基本原理

Fig.2 The measuring principles by using interference

由透镜 4 会聚的光被被测面反射, 由于被测面存在中心偏差, 其传播方向相对光轴的发生偏转, 其复振幅表达为

$$E_1 = A_1 \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{2\Delta_x f_2}{f_1 f_3} x + \frac{2\Delta_y f_2}{f_1 f_3} y \right) \right] \quad (2)$$

式中,  $A_1$  是振幅,  $\lambda$  是相干光源波长,  $\Delta_x$ 、 $\Delta_y$  分别表示被测面距参考轴系  $x$ 、 $y$  方向上的中心偏差,  $f_1$ 、

$f_2$  和  $f_3$  分别为透镜 4、透镜 6 和透镜 7 的焦距.

参考光的复振幅为

$$E_2 = A_2 \quad (3)$$

测量光与参考光发生干涉, 在 CCD 平面上的干涉强度为

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{2\Delta_x f_2}{f_1 f_3} x + \frac{2\Delta_y f_2}{f_1 f_3} y \right) \right] \quad (4)$$

由式(4)可知, 测量光与参考光干涉形成平行的等间距条纹, 如图 3.

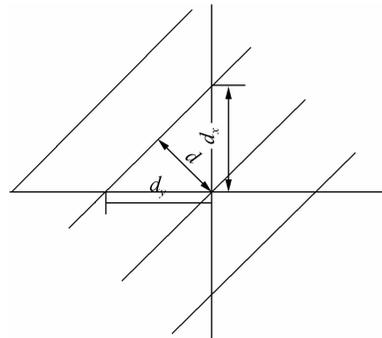


图3 干涉条纹示意图

Fig.3 Schematic diagram of interference

在  $x$  和  $y$  方向上的条纹宽度分别为<sup>[12]</sup>

$$\Delta_x = \lambda f_1 f_3 / 2 d_x f_2 \quad (5)$$

$$\Delta_y = \lambda f_1 f_3 / 2 d_y f_2 \quad (6)$$

式中,  $d_x$ 、 $d_y$  分别是干涉条纹在  $x$ 、 $y$  方向上的距离. 根据图 3 中的几何关系, 则有

$$d_x^2 d_y^2 = d^2 (d_x^2 + d_y^2) \quad (7)$$

由中心偏差的几何关系, 总中心偏差  $\Delta_2$  表示为

$$\Delta_2 = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} \quad (8)$$

根据式(5)~(8)可得

$$\Delta_2 = \lambda f_1 f_3 / 2 d f_2 \quad (9)$$

由式(9)可知, 干涉法测量的中心偏差与干涉条纹宽度成反比, 并且与  $d_x$ 、 $d_y$  分量比例大小无关, 即与转台转动的角度无关.

### 1.3 双光路成像干涉法测量原理

双光路成像干涉测量镜片中心偏差的测量原理如图 4 所示. 相干光源 1、会聚透镜 2、针孔 3、准直透镜 4、半波片 5 构成共用的准直光路. 偏振分束器 6 将准直光分成两束, 一束经过四分之一波片 7 和反射镜 8 形成参考光用于干涉测量; 另一束经过四分之一波片 9、转向镜 10、会聚透镜组 11、分束器 12 再分别与转向镜 13 及遮光板 14 以及转向镜 16 及遮光板 17 构成复用的两个测量光路. 测量光路的选择通过控制两块遮光板来实现: 当使用准直成像测量进行测量时, 被测透镜 15 反射的光包含待测中心偏差的信息沿原路返回, 由分束器 19 反射在 CCD20 成

像,其测量原理如 1.1 节所述;当进行干涉测量时,复用上述光路,同样包含测量信息的反射光束沿原路返回和参考光束一起进过透镜 18、分束器 19、透镜 21、检偏器 22 在 CCD23 上形成干涉,通过分析干涉条纹测量中心偏差,其原理如 1.2 节所述.

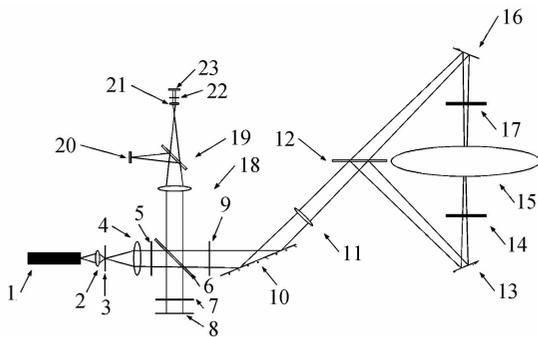


图 4 双光路干涉中心误差测量系统原理

Fig. 4 The measuring principles by using collimation and interference with two channels

两个测量阶段复用测量光路,均使用转台的转动轴作为参考轴,使用同一基准参考轴系,有利于减小使用不同参考轴系照成的传递误差.同时使用双测量光路代替单测量光路,可以直接测量各测量面的中心偏差,不需要迭代计算,从而消除了前测量面准确度对后测量面准确度的影响,解决误差累积问题.

在整个测量系统中采用偏振分束器 6,配合  $\lambda/4$  波片 7 和 9 构成分光系统,可以解决传统分束器光强利用率低的问题,同时防止回射光对光源稳定性的影响,并且有效抑制杂散光的影响,提高测量准确度.采用半波片和偏振分水器调整偏振分量,配合检偏器形成干涉条纹.这种设计可以根据被测面的反射率不同,调整测量光和参考光两束光光强,来得到好的条纹对比度,有利于提高测量准确度.

## 2 测量系统设计

### 2.1 系统参量

选择 He-Ne 激光器作为光源,波长  $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ .选用的 CCD 的像元尺寸为  $p=10 \mu\text{m}$ ,最大像元个数  $N=1000$ .由于测量时需要使测量光会聚在被测表面的球心处,考虑测量凸面的需求,选择后工作距远大于焦距的远摄型透镜组,  $f_1=100 \text{ mm}$ .根据准直测量的要求,选择焦距远大于其工作距应为反远型透镜组,使  $f_2=500 \text{ mm}$ .综合考虑干涉测量的分辨率以及准直测量和干涉测量的量程等问题,使  $f_3=1.5 \text{ mm}$ .

### 2.2 测量范围

对于准直成像测量,测量光斑在 CCD 上测量所

成轨迹圆的半径长度为  $n$  个像元,即

$$r=np \quad (10)$$

将式(10)带入式(1)得准直成像可测量的中心偏差为

$$\Delta_1=npf_1/2f_2 \quad (11)$$

则当轨迹圆半径为  $N/2$  像元时,准直测量法能测量最大中心偏差为:  $\Delta_{1\text{max}}=Npf_1/4f_2=500 \mu\text{m}$ .

同理,当轨迹圆半径为 1 个像元时,准直测量法测量最小中心偏差为:  $\Delta_{1\text{min}}=pf_1/2f_2=1 \mu\text{m}$ .

中心偏差与测量光斑轨迹圆半径成正比,中心偏差随轨迹圆半径的减小而减小,在此阶段进行磨边定心,测量范围从  $1 \mu\text{m}$  到  $500 \mu\text{m}$ ,根据轨迹圆半径将中心偏差调整至最小,如图 5.

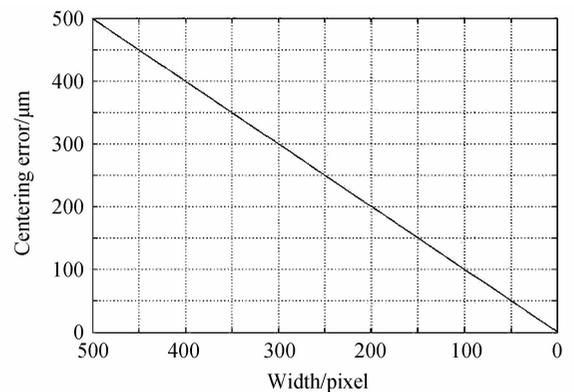


图 5 准直测量法测量的中心偏差与轨迹圆半径的关系

Fig. 5 The centering error with track circle's radius by using collimation

对于干涉测量阶段,一个干涉条纹宽度在 CCD 上对应的像元为

$$d=np \quad (12)$$

将式(12)带入式(9)可得干涉测量法测得的中心偏差为

$$\Delta_2=\lambda f_1 f_3/2n p f_2 \quad (13)$$

条纹宽度为 2 像元时,干涉测量法能测量的最大中心偏差为:  $\Delta_{2\text{max}}=\lambda f_1 f_3/4 p f_2=4.746 \mu\text{m}$ .

由于此时像元数很小,条纹分布很密,很难进行进一步处理准确获得中心偏差.综合考虑准直测量的最小测量值和量程衔接的余量,干涉法测量需要测量的最大中心偏差修正为:  $\Delta_{2\text{max}}=1.9 \mu\text{m}$ .

同理,条纹宽度为  $N$  像元时,干涉测量法能测量最小中心偏差为:  $\Delta_{2\text{min}}=\lambda f_1 f_3/2N p f_2=0.01 \mu\text{m}$ .测量的中心偏差与干涉条纹宽度像元数成反比,中心偏差随轨迹圆半径的增大而减小,测量范围从  $1.9 \mu\text{m}$  到  $0.01 \mu\text{m}$ ,根据测量结果在装配定心阶段使中心偏差达到最小,其关系如图 6.

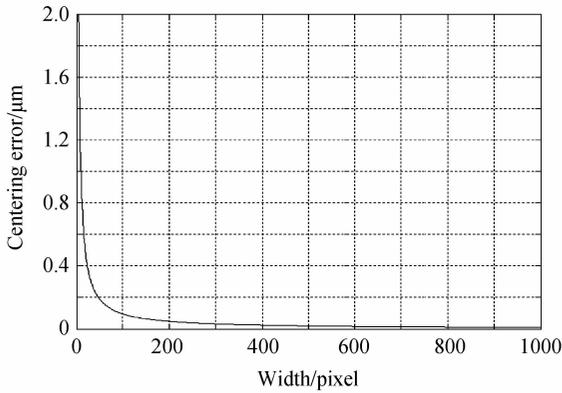


图6 干涉测量法测量中心偏差  
Fig. 6 The centering error with width by using interference

### 2.3 测量灵敏度

对于准直成像测量,根据式(11)可得中心偏差每步测量中心偏差增量为

$$\partial\Delta_1/\partial n = pf_1/4f_2 \quad (14)$$

令灵敏度为中心偏差增量和中心偏差的比值,比值越小灵敏度越高,则准直测量中心偏差灵敏度为

$$\kappa_1 = \left| \frac{\partial\Delta_1}{\Delta_1 \partial n} \right| = \frac{1}{n} \quad (15)$$

所以,准直成像测量阶段,随轨迹圆半径的减小即中心偏差的减小,中心偏差灵敏度单调减小,最高的灵敏度为0.2%,整个阶段不高的灵敏度有效地保证了磨边定心的效率,如图7.

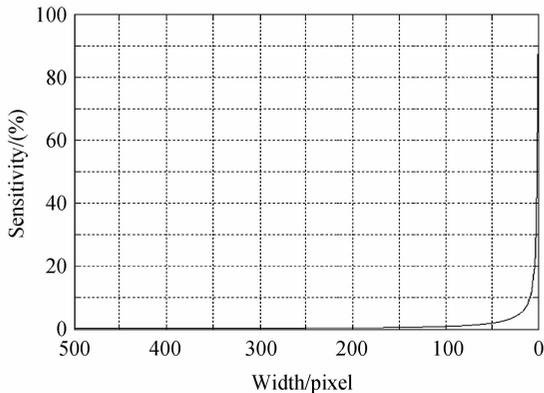


图7 准直成像测量的灵敏度与轨迹圆半径关系  
Fig. 7 The sensitivity with track circle's radius by using collimation

对于干涉测量,根据式(13)可得中心偏差每步测量中心偏差增量为

$$\frac{\partial\Delta_2}{\partial n} = -\frac{\lambda f_1 f_3}{2n^2 p f_2} \quad (16)$$

式中负号仅表示增量为负值,所以干涉测量灵敏度表示为

$$\kappa_2 = \left| \frac{\partial\Delta_2}{\Delta_2 \partial n} \right| = \frac{1}{n} \quad (17)$$

所以,干涉测量阶段,随干涉条纹宽度的增大即中心偏差的减小,中心偏差灵敏度单调增大,并且在

干涉条纹最宽时达到最大值0.1%,整个阶段较高的测量灵敏度对最终在装配定心阶段将中心偏差调整到一个非常小的量十分有利,如图8.

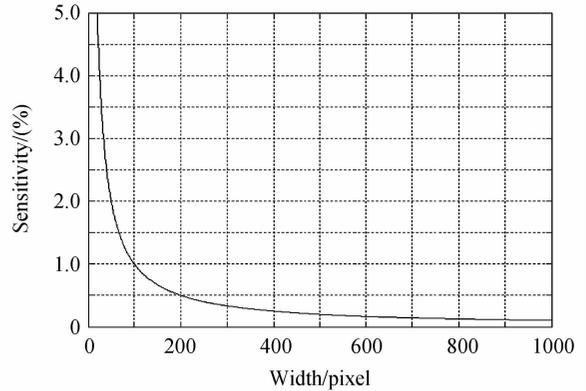


图8 干涉测量灵敏度与干涉条纹宽度的关系  
Fig. 8 The sensitivity with width by using interference

### 2.4 测量准确度

对于准直成像测量法,根据误差传递公式,由式(1)得测量准确度

$$\delta_{\Delta_1} = \frac{f_1}{2f_2} \delta_r \quad (18)$$

由轨迹圆半径测量引起的误差随半径的变换保持不变,如图9.

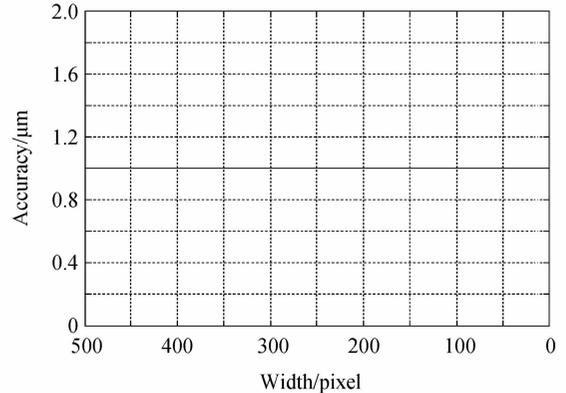


图9 准直成像测量的准确度与轨迹圆半径关系  
Fig. 9 The accuracy with track circle's radius by using collimation

考虑到转台的误差 $\delta_0$ ,式(18)修正为

$$\delta_{\Delta_1} = \sqrt{\left(\frac{f_1}{2f_2} \delta_r\right)^2 + \delta_0^2} \quad (19)$$

由式(19)可知,主要误差来源有两个,一个是轨迹圆半径的测量误差 $\delta_r$ ,准直测量过程中最大为1个像元,另一个是转台基准轴变化带来的误差,设其在准直测量过程中最大值为0.2 $\mu\text{m}$ ,所以准直测量过程中主要误差源是轨迹圆半径的测量误差.

$$\delta_{\Delta_1} = \sqrt{(1\mu\text{m})^2 + (0.2\mu\text{m})^2} = 1.02\mu\text{m} \quad (20)$$

对于干涉测量,根据误差传递公式,由式(9)得测量准确度为

$$\delta_{\Delta_2} = -\frac{\lambda f_1 f_3}{2d^2 f_2} \delta_d \quad (21)$$

由式(21)可知,由干涉条纹宽度测量误差引起的误差与条纹宽度的平方成反比,条纹宽度越宽,误差越小,即中心偏差最小时,最终误差达到最小,如图10.

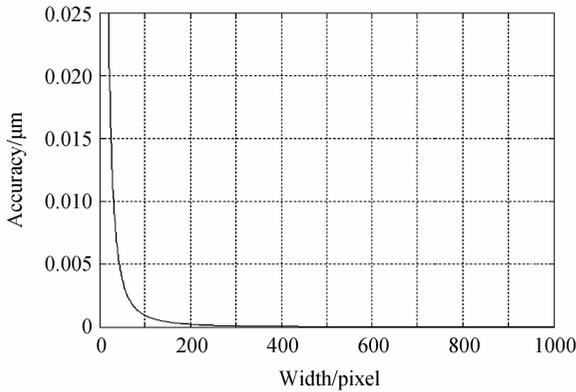


图10 干涉测量准确度与干涉条纹宽度的关系  
Fig. 10 The accuracy with width by using interference

考虑到转台引入的误差  $\delta_0$ ,式(21)修正为

$$\delta_{\Delta_2} = \sqrt{\left(\frac{\lambda f_1 f_3}{2d^2 f_2} \delta_d\right)^2 + \delta_0^2} \quad (22)$$

由式(22)可知,主要误差来源有两个:一个是干涉条纹宽度的测量误差  $\delta_d$ ,在干涉测量过程中最大不超过1个像元;另一个是转台基准轴变化带来的误差,设其在准直测量过程中不超过  $0.2 \mu\text{m}$ ,所以转台基准轴变化引入的误差是测量误差的主要来源,最终测量准确度:  $\delta_{\Delta_2} = 0.2 \mu\text{m}$ .

对比准直成像法、干涉法测量、双光路成像干涉法中心偏差时的测量范围和中心偏差最小时的最终测量灵敏度以及最终测量准确度,具体数值如表1.

表1 三种测量方法的比较

Table 1 Comparison of three methods for measurement

	Collimation	Interference	Collimation and interference
Measurement range/ $\mu\text{m}$	1~500	0.01~1.9	0.01~500
Final sensitivity/(%)	100	0.1	0.1
Final accuracy/ $\mu\text{m}$	1.02	0.2	0.2

### 3 结论

本文提出了一种成像和干涉相结合的定心方法,完成了测量系统参数的设计,并对该测量系统的测量范围、最终灵敏度以及最终准确度进行了分析,结果表明该系统测量范围从  $0.01 \mu\text{m}$  到  $500 \mu\text{m}$ ,在

最终调整中心偏差至最小时,灵敏度为  $0.1\%$ ,测量准确度达到  $0.2 \mu\text{m}$ ,可以满足在磨边定心阶段大量程、低灵敏度、低准确度以及装配定心阶段小量程、高灵敏度、高准确度的定心测量要求.

#### 参考文献

- [1] ZHOU Geng-xia, BAN Shu-bao, SUN Tian, *et al.* Resolution of micro-stereo-lithography system using high viscosity nanocomposites[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(5): 867-871.  
周庚侠,班书宝,孙天玉,等. 大粘度复合纳米材料面投影微立体光刻系统的分辨率研究[J]. *应用光学*, 2011, **32**(5): 867-871.
- [2] SHEN Yi, WU Yi-xu, XING Yan-bing, *et al.* Multi-beam maskless lithograph system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(4): 537-539.  
沈易,吴翌旭,邢燕冰,等. 多光束无掩模光刻系统[J]. *应用光学*, 2010, **31**(4): 537-539.
- [3] LIU Fei, LI Yan-qiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 232-238.  
刘菲,李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 232-238.
- [4] WOOTERS G. Lens centering in microscope objectives[J]. *JOSA*, 1950, **40**(8): 521-523.
- [5] LIN Yu-chi, DONG Gui-mei, HUANG Yin-guo, *et al.* Research on measurement of lens centering errors based on image processing[C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68341H-1-7.
- [6] FAN Xue-wu, CHEN Rong-li, MA Zhen, *et al.* A study on the primary aberration theory of decentered and tilted optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 494-496.  
樊学武,陈荣利,马臻,等. 偏心和倾斜光学系统初级像差理论的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(4): 494-496.
- [7] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang, *et al.* Aberration properties of the decentered and tilted optical systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1658-1662.  
杨新军,王肇圻,母国光,等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1658-1662.
- [8] LI Yan-qing, GAO Jun-jie. Research on the measurement and adjustment of infrared optical lens decentration using laser method[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 165-167.  
李燕青,高俊杰. 激光法红外热像镜组中心偏测量与调校研究[J]. *光学技术*, 2002, **28**(2): 165-167.
- [9] HEINISCH J, LANGEHANENBERG P, PANNHOFF H. Complete characterization of assembled optics with respect to centering error and lens distances[C]. *SPIE*, 2011, **8082**: 80821M-1-7.
- [10] HEINISCH J, DUMITRESCU E, KREY S. Novel technique for measurement of centration errors of complex, completely mounted multi-element objective lenses[C]. *SPIE*, 2006, **6288**: 628810-1-7.
- [11] LANGEHANENBERG P, DUMITRESCU E, HEINISCH J, *et al.* Automated measurement of centering errors and relative surface distances for the optimized assembly of micro optics[C]. *SPIE*, 2011, **7926**: 79260E.
- [12] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 240-245.

## Design of Centering System by Using Collimation and Interference with Two Channels

FANG Chao, XIANG Yang

(*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** In order to meet different centering measurement demands when edging and assembling the projection lens, a centering system by using collimation and interference with two channels is proposed. The system use collimation and interference in the same optical configuration. Parameters of the measurement system are designed, and measurement range, sensitivity and the measurement accuracy are analyzed in theory. The results show that measurement range of the system by using collimation is from  $1\ \mu\text{m}$  to  $500\ \mu\text{m}$ , the highest sensitivity is  $0.2\%$ , and accuracy reach  $1.02\ \mu\text{m}$ ; the measurement range of the system by using interference is from  $0.01\ \mu\text{m}$  to  $1.9\ \mu\text{m}$ , the lowest sensitivity is  $0.1\%$ , and accuracy reach  $0.2\ \mu\text{m}$ . The design can satisfy demands of a wide range, low sensitivity, low accuracy in centering-edging stage, and small range, high sensitivity, high accuracy in assembling stage. The centering system can meet the design requirements, and can guide the production and assembly of lithographic projection lens.

**Key words:** Measurement; Collimation; Interference; Two channels