

# 极坐标激光直写系统原点定位的实验研究\*

李凤有<sup>1,2</sup> 谢永军<sup>2</sup> 卢振武<sup>2</sup> 王肇圻<sup>1</sup>

(1 南开大学现代光学研究所,天津 300071)

(2 中国科学院长春光机与物理研究所应用光学国家重点实验室,吉林长春 130022)

**摘要** 分析了旋转线性光栅法对准光轴与旋转机械轴中心的理论准确度,实验研究了极坐标激光直写系统的原点定位.在极坐标激光直写系统下进行了圆环线条写入实验,得出了原点定位的准确度,原点定位准确度优于  $0.5 \mu\text{m}$ ,实验与理论定位准确度基本一致.

**关键词** 极坐标激光直写系统;坐标原点定位;激光直写

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A

## 0 引言

通常用于检测非球面的计算全息图(CGH)要求圆环位置准确度不低于  $0.5 \mu\text{m}$ ,有的甚至优于  $0.1 \mu\text{m}$ ,只能采用极坐标的激光直写系统或电子束直写系统制作.在极坐标激光直写系统中,旋转工作台的轴心为坐标原点,在写入CGH图样之前,写入光点与旋转工作台中心需要精确对准,即极坐标激光直写系统的坐标原点定位,原点定位误差直接引入CGH图样位置误差,从而影响非球面检测准确度<sup>[1-3]</sup>.

目前已有几种确定极坐标激光直写系统坐标原点的方法<sup>[4-6]</sup>,美国麻省理工学院林肯实验室采用楔形反射基片对准方法,误差小于  $0.2 \mu\text{m}$ ;美国亚利桑那大学光学中心采用基于旋转线性光栅的对准技术,准确度接近  $0.1 \mu\text{m}$ ;俄罗斯科学院自动化和电测研究所提出在金属膜层写入小圆环,通过使用显微镜或光电扫描测量方法来实时对准光点和旋转轴中心,准确度近似为  $0.1 \mu\text{m}$ .上述方法都给出了原点的定位准确度,但是并未见到定位准确度的实验验证,通常  $0.1 \mu\text{m}$  的原点定位准确度是很难直接实验验证.为了确定文献[8]所使用的极坐标激光直写系统制作CGH所引入的误差,测量写入光点与旋转工作台中心的相对位置是必要的,即确定坐标原点定位准确度,确定地给出CGH的径向坐标误差.本文开展了极坐标写入系统的原点定位的实验研究,通过对准实验完成坐标原点的定位,在随后的激光直写光刻实验中获得了实验数据,分析检测结果得出原点定位准确度.

## 1 原理

采用旋转线性光栅方法<sup>[7]</sup>实现极坐标原点定

位,如图1所示,设需要对准的写入光点和工作台旋转中心的距离为  $\Delta$ .在初始的对准步骤中,光栅放在靠近旋转中心区域的旋转工作台上,不必要让光栅相对于盘的中心精密定位,仅要求光栅跨越两个轴的中心.如果  $\Delta$  不为零,旋转工作台转动时导致焦斑跨越光栅扫描.在跨越光栅扫描过程中,反射光  $\pm 1$  级的位相相对零级改变.位相差决定衍射级的重叠区域干涉条纹的位移量,在光学系统的出瞳处可以观察到条纹移动.  $\Delta$  越小,条纹位移量越小,若条纹不发生移动,写入光点中心就与旋转轴中心对准了,即写入光点与坐标原点重合.

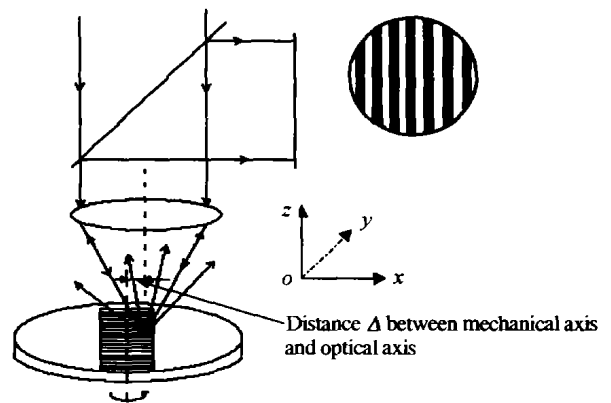


图1 旋转线性光栅坐标原点定位原理图

Fig. 1 Schematic diagram of fixing the origin of polar coordinate by rotation linear grating

现在把观察屏上最小可观测的条纹移动  $\delta$  和一个最小的未对准的差值  $\Delta_{\text{min}}$  联系起来.因为未对准差值远大于一个光栅周期  $\Lambda$ ,是容易被观测到的,重点放在小于一个光栅周期的未对准差值( $\Delta < \Lambda$ )的观测.旋转光栅一圈后,光点中心与旋转轴间距  $\Delta$  与条纹位移量  $\delta$  的关系是<sup>[7]</sup>

$$\frac{2\Delta}{\Lambda} = \delta$$

对于给定的量  $\Delta$ ,  $\delta$  随着光栅周期  $\Lambda$  的减小而增加.如果观测的条纹位移量约为条纹宽度五分之一,即  $\delta = 1/5$ ,则理论上光点与坐标原点的对准准确度为  $\Delta_{\text{min}} = \Lambda/10$ .要根据写入光点的大小来选择光栅周

\*国家自然科学基金(60078006)、中科院创新基金资助项目  
Email: lify@sklao.ac.cn  
收稿日期:2003-09-16

期,以确保 $\pm 1$ 级反射光在出瞳处不交叠,不会影响干涉条纹的观测,通常光栅周期与写入光点直径接近.所用激光直写系统的写入光点直径约为 $5\ \mu\text{m}$ ,采用周期 $\Lambda = 5\ \mu\text{m}$ 光栅,理论对准准确度为 $0.5\ \mu\text{m}$ .

## 2 实验与结果

实验使用的激光直写系统<sup>[8,9]</sup>写入光点沿 $X$ 方向运动实现径向移动,重复定位准确度为 $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ (在 $100\ \text{mm}$ 内),旋转工作台旋转中心为极坐标原点.写入光点在 $X$ 方向基本穿越旋转工作台的轴心,旋转工作台位于可移动的花岗岩基座上.在极坐标写入系统工作之前,需要把写入物镜光学轴心与旋转轴心精确对准,也就是确定极坐标写入系统的原点.写入光点只能沿 $X$ 方向运动,而初次原点定位必须在垂直方向 $Y$ 的对准,需要微移动旋转工作台基座.激光直写系统的写入光点直径约为 $5\ \mu\text{m}$ ,选择周期 $\Lambda = 5\ \mu\text{m}$ 光栅来进行写入光点与坐标原点对准实验.

对准过程采用旋转光栅方法,光栅放置在工作台上接近于旋转轴心,要保证让光栅跨过区域包括光点与旋转轴心.从 $X$ 和 $Y$ 两个正交方向进行坐标原点定位,根据光点扫描光栅的方向以及相对应观察屏上条纹的移动方向,来判断光点和工作台基座如何运动.当栅线在与 $X$ 方向垂直位置时,若条纹移动速度较快,则原点与光点在 $Y$ 方向的间隔较大,移动工作台基座;当栅线在与 $Y$ 方向垂直位置时,若条纹移动速度较快,则原点与光点在 $X$ 方向的间隔较大,移动光点接近坐标原点.先采用弹性探针放置在涂有薄膜的圆平晶几何中心上,工作台匀速旋转得到一圆圈轨迹,沿径向朝中心移动探针,直到观察到探针的轨迹为圆点为止,随后把写入光点移动到圆点内.之后用光栅进行对准,通过调节离焦量,在观察屏上可出现等间隔的直条纹.在实验初始阶段,光点与旋转轴中心大概对准.于是,在光栅同旋转轴一起旋转时,离焦的光点穿越多条栅线,在屏上观察到条纹快速移动,光点和旋转中心距离越大,条纹移动越快,一个条纹位移量对应半个光栅周期.当光点和旋转中心的距离较小时,条纹移动速度变慢,在观察屏上可清楚看到条纹向外移动, $\Delta$ 接近光栅周期时,条纹继续向外移动并开始旋转,根据条纹移动方向和旋转方向判断离心 $\Delta$ 的方向.然后,把条纹位移量的减小作为正反馈,光点逐渐地向原点方向移动,步长越来越小,这个过程继续进行直到光点的运动不再产生可分辨的条纹位移为止.观察屏上直条纹只围绕着一旋转,已看不到条纹

移动.减小离焦量,使屏上只有一个条纹,重复上述对准步骤,直到再次观察不到条纹的位移为止,此时认为光点与旋转中心对准了,原点的定位误差应小于 $0.5\ \mu\text{m}$ .

下面利用极坐标激光直写系统写入圆环来检验坐标原点定位准确度.使用表面粗糙度很好的K9玻璃基片,旋转涂布S1813正性光刻胶,膜厚为 $2\ \mu\text{m}$ ,放在烤箱内 $90^\circ\text{C}$ 烘干时间 $30\ \text{min}$ .把基片固定在旋转工作台,写入光点沿径向移动 $8\ \mu\text{m}$ ,精确调焦后,工作台转速 $200\ \text{rpm}$ ,激光功率 $3.6\ \text{mW}$ ,在胶膜上曝光写入半径 $8\ \mu\text{m}$ 的圆形线条,显影后利用原子力显微镜检测圆形线条,如图2,图中纵坐标是垂直方向扫描距离,单位是纳米;横坐标是在水平方向扫描距离,单位是微米.

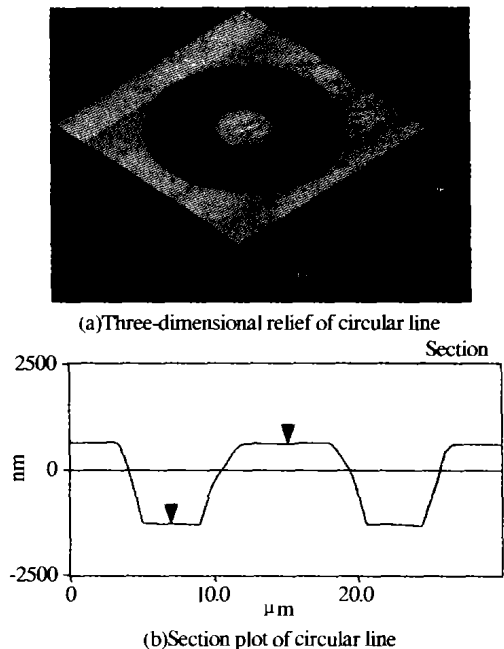


图2 原子力显微镜测得的圆形线条  
Fig. 2 Photograph of circular line obtained by atomic force microscopy

从多个方向测量圆环,其外环直径平均值为 $2R = 19.45\ \mu\text{m}$ ,内环直径平均值 $2r = 11.60\ \mu\text{m}$ ,因此,计算可知圆环线宽 $d = 3.925\ \mu\text{m}$ ,写入光点实际径向坐标为 $7.76\ \mu\text{m}$ ,径向坐标误差为 $-0.24\ \mu\text{m}$ ,如果不计径向定位误差和测量误差,该径向坐标误差就是坐标原点的定位误差.考虑机械定位误差为 $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ ,原子力显微镜横向测量误差 $20\ \mu\text{m} \div 512 = \pm 0.039\ \mu\text{m}$ ;气浮旋转工作台的径向抖动小于 $\pm 0.03\ \mu\text{m}$ ,在最坏情况下,原点定位误差 $\Delta = 0.24 + 0.2 + 0.039 + 0.03 = 0.51\ \mu\text{m}$ ,完全可以确定坐标原点定位误差优于 $0.5\ \mu\text{m}$ .因为激光直写实验的温度、湿度、震动等实验环境控制严格,环境对定位准确度检测实验的影响可以忽略.

### 3 结论

实现了极坐标激光直写系统原点的精确定位, 研究结果验证的定位准确度与理论计算结果一致, 极坐标原点定位准确度在  $0.5 \mu\text{m}$  以内. 实验研究表明, 旋转线性光栅是一种实现原点精确定位方法, 可用于其它的精密回转轴系的对准, 若需要更高的原点定位准确度要求, 可采用更小的光点和相应周期的光栅来对准.

#### 参考文献

- Freimann R. Aberrations of axially symmetric diffractive optical elements in relation to their fabrication inaccuracies. *Optik*, 2000, **111**(11):485 ~ 492
- Chang Yuchun, Burge J. Error analysis for CGH optical testing. *Proc SPIE*, 1999, **3782**:358 ~ 366
- Poleshchuk A, Korolkov V, Cherkashin V, et al. Polar coordinate laser writing systems; error analysis of fabricated DOEs. *Proc SPIE*, 2001, **4440**:161 ~ 172
- Goltsos W, Liu S. Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication. *Proc SPIE*, 1990, **1211**:137 ~ 147
- Vernold C L, Milster T D. Non-photolithographic fabrication of large computer-generated diffractive optical elements. *Proc SPIE*, 1994, **2263**:125 ~ 133
- Koronkevich V P, Kiriyanov V P, Korol'kov V P, et al. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser writing with circular scanning. *Proc SPIE*, 1994, **2363**:290 ~ 297
- Milster T D, Vernold C L. Technique for aligning optical and mechanical axes based on a rotating linear grating. *Opt Eng*, 1995, **34**(10):2840 ~ 2844
- Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun, et al. Laser direct writing system with cartesian and polar coordinate. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5):616 ~ 619
- 李凤有, 卢振武, 谢永军, 等. 激光直写方法制作透明导电金属网栅. *光子学报*, 2002, **31**(10):1270 ~ 1272  
Li F Y, Lu Z W, Xie Y J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10):1270 ~ 1272

## Experimental Study on Fixing the Origin of Polar Coordinate Laser Writing Systems

Li Fengyou<sup>1,2</sup>, Xie Yongjun<sup>2</sup>, Lu Zhenwu<sup>2</sup>, Wang Zhaoqi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

<sup>2</sup> State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031

Received date:2003-09-16

**Abstract** Based on the method of rotating linear grating, theoretical accuracy of aligning the axis of an optical system to the axis of a rotating mechanical system is analyzed. The experiments of positioning the coordinate origin are developed under polar laser direct writing system. The circular lines written in laser writing lithography and measurement results are obtained. The results show that position accuracy of the origin of polar coordinate is better than  $0.5 \mu\text{m}$ . The experimental accuracy agrees with theoretical accuracy.

**Keywords** Polar coordinate laser writing systems; Fixing the origin of coordinate; Laser direct writing



**Li Fengyou** received his B. S. degree in physics from Jilin Normal College, China, in 1992, his M. S. degree and Ph. D. in optics from The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of OFMP, Chinese Academy of Sciences in 1999 and in 2002, respectively. Currently, he is engaging in his postdoctoral research works in Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin, China. His research interests include the design and fabrication of DOE's, micro-lithography, laser direct writing techniques, aspherical surface testing and ion beam etching techniques.