

文章编号 1004-924X(2014)09-2444-08

## 二维零位光栅自动纳米定位系统

李家文, 陈宇航, 胡衍雷, 劳召欣, 褚家如\*, 黄文浩

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 搭建了能够在二维方向上实现纳米级定位的二维自动定位系统。首先, 加工了栅格间距为  $5\ \mu\text{m}$  的  $64\times 64$  编码的透射式二维零位光栅; 然后, 分析设计了光栅系统光电转换电路和数据控制电路, 实现了系统数据采集、显示和运动控制等功能。在此基础上搭建了基于二维零位光栅的纳米定位系统, 并利用积分法实现了二维方向的自动定位。实验结果表明, 系统定位速度对透射光强分布具有很高的依赖性, 系统一次定位的成功率与初始位置密切相关。若起始位置在以零位为中心, 半径为  $2.5\ \mu\text{m}$  圆形区域内, 系统可实现纳米量级定位对准; 当起始位置在以零位为中心,  $5\sim 200\ \mu\text{m}$  为半径的圆环范围内, 自动定位可能存在盲点, 但通过改变初始位置重新进行搜索, 仍然能够准确地实现纳米定位。

**关键词:** 二维零位光栅; 自动对准; 定位算法; 电路噪声; 精度分析

**中图分类号:** TP273; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2444

## Automatic nano-positioning system based on two-dimensional zero-reference gratings

LI Jia-wen, CHEN Yu-hang, HU Yan-lei, LAO Zhao-xin, CHU Jia-ru\*, HUANG Wen-hao

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

\* Corresponding author, E-mail: jrch@ustc.edu.cn

**Abstract:** An automatic positioning system using a pair of two-dimensional (2-D) zero-reference gratings was established to implement the nano-positioning in 2D directions. Firstly, the  $64\times 64$  coded 2-D zero-reference gratings with a grid width of  $5\ \mu\text{m}$  was designed and fabricated. Then, the photoelectric conversion circuit and control circuit were built for the automatic nano-positioning system to implement data acquisition, display and motion control and other functions. Finally, an automatic positioning algorithm using an integral method was proposed to achieve the automatic positioning in 2D directions. The results show that the system positioning speed depends on the transmittance of light intensity distribution and the positioning success rate is related to the starting position. If the starting position is located in the central circular area with a radius of  $2.5\ \mu\text{m}$ , this equipment may achieve nanoscale positioning. If the starting position is located in the central circular area with a radius range of  $5\sim 200\ \mu\text{m}$ , the automatic alignment may present blind spots. In this case,

收稿日期: 2013-12-15; 修订日期: 2014-02-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51275502, 91223203); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2011YQ040136); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2012M511416, 2012M521245); 中央高校基本科研业务费专项基金青年创新基金资助项目(No. KB2090090001)

the starting positions should be changed to perform the positioning process again and the alignment will be achieved successfully.

**Key words:** two-dimensional zero-reference grating; automatic alignment; positioning algorithm; circuit noise; precision analysis

## 1 引言

随着科学技术不断地向微尺度领域深入发展,高精度的定位和对准系统在科研和生产应用中发挥了越来越重要的作用<sup>[1]</sup>。航天技术、微电子工程、精密工程、计量科学与技术、光学与光电子工程、生物工程、纳米科学与技术等领域迫切需要纳米级的定位对准<sup>[2-3]</sup>。纳米定位技术已成为前沿科学、工程技术领域的关键技术之一,在纳米加工<sup>[4]</sup>和测量装备<sup>[5]</sup>等领域具有广阔的应用前景。

二维零位光栅定位系统是一种非接触式的、大尺度、高精度的新型技术,能够实现 20 nm 的定位精度,与传统增量式计量光栅定位系统相比,该系统具有能建立起始原点、实现消除累计误差、误差修正和停电归零记忆等特点<sup>[6]</sup>。目前,国内外研究人员的关注重点主要集中在二维零位光栅的编码设计上。编码算法的时间复杂度和空间复杂度与二维零位光栅的编码数量相关,二维零位光栅的编码设计方法一直在不断发展和完善中。Jose Saez-Landete 等在编码设计中引入全局优化算法<sup>[7]</sup>和遗传算法<sup>[8]</sup>,使二维零位编码速度大大提升;Yi-Sheng Su 等则采用交叉熵法<sup>[9]</sup>,使二维零位编码的设计效率大大提高。在二维零位光栅对准系统性能研究上,Zhou Chenggang 等人<sup>[10]</sup>采用更为贴近现实情况的衍射理论研究二维零位光栅对准系统的影响因素,如光栅间距、光栅面内转角、光栅制造误差、编码误差等,并实验验证了系统具有 20 nm 的定位精度;Jose Saez-Landete<sup>[11]</sup>和 Yi-Sheng Su 等人<sup>[12]</sup>分别用遗传算法和交叉熵法优化编码使之对衍射效应不敏感。但二维零位光栅的实验系统研究还比较缺乏。本课题组已搭建了二维零位定位实验系统,用作确定测量系统的零位<sup>[10]</sup>和表征扫描探针显微镜漂移特性<sup>[5]</sup>,系统必须先用手动的在一维方向

上实现初步对准后才能实现在另一维方向上的自动定位。如何实现二维方向上的自动纳米定位还未见报道。

本文设计了基于二维零位光栅的自动定位系统,以实现两平行光栅在二维方向上自动对准,该系统可实现纳米级定位精度,在纳米制造装备及纳米测量装备领域具有广阔的应用前景。

## 2 二维零位光栅自动定位系统的原理及组成

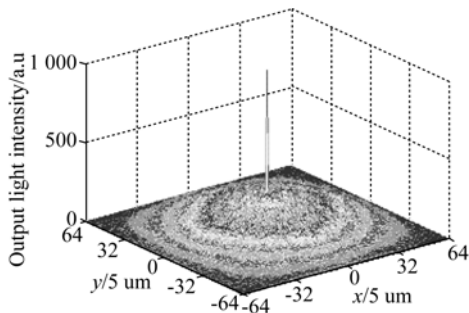
### 2.1 二维零位光栅定位系统的原理

二维零位光栅的突出优点是通过特殊设计的非周期性编码来产生一个表征二维方向上绝对零位的最大输出峰。当 2 块相同的二维零位光栅位置平行且完全对准时,透过的光强会达到最大峰值,峰值半宽仅为 1 个光栅单元栅格尺寸,当 2 块二维零位光栅的相互位置稍有偏移,透过光强即急剧衰减。

二维零位光栅编码设计的主要参数有光栅大小、零位峰值高度(最大输出光强)以及峰值对比度。设计的一个重要原则是在提高峰值对比度的同时尽量降低输出光强的次大值。除此之外,对于一个实际应用的二维零位光栅系统,光栅的栅格尺寸、入射光的波长以及光栅的面间距等也有重要影响。为了达到小于 $\pm 10$  nm 的重复定位精度,本文采用随机法编码设计出  $64 \times 64$  矩形单元的二维零位光栅,在玻璃掩膜板上电镀一层金属铬,并用电子束刻蚀铬加工而成栅格宽度  $5 \mu\text{m}$  的透射式二维零位光栅,如图 1(a)所示。图 1(b)为该两光栅相对位置与透射光强理论关系图。由图可知,除零位峰以外,可以看见许多细小的次级峰。当光栅相对距离较大时,输出光强较小;当光栅间距逐渐减小时,透过光强总体呈增加趋势;当光栅间距小于  $5 \mu\text{m}$  时(1 个栅格宽度),光强迅速增加,出现 1 个极大峰。



(a) 64×64 单元特殊编码二维零位光栅显微照片  
(a) Specially encoded grating with 64×64 units



(b) 透射光强与光栅相对位移关系图  
(b) Relationship between transmitted light intensity and grating relative position

图 1 二维零位光栅基本情况

Fig. 1 Fundamental states of 2D zero-reference gratings

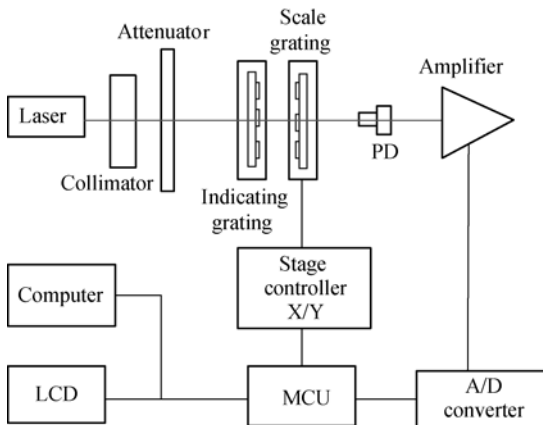


图 2 二维零位光栅定位系统

Fig. 2 Positioning system of two-dimensional zero-reference grating

2.2 二维零位光栅自动定位系统组成

二维零位光栅定位系统主要用于两平行光栅的对准,图 2 所示为系统原理图,它由激光器、光隔离器、光学衰减片、二维零位光栅副、定位平台及驱动电机等构成。激光器发出的光通过光隔离

器,经准直和衰减后,照射到指示光栅上,透过光再照射到标尺光栅。经过这一对光栅副透射出来的光被光电传感器接收,并产生了光电流。光电流信号通过放大电路,将输出的光强信号转化为电压值信号,再经模拟数字转换器转换成 12 位数字信号,CPU 通过对数据信号进行采样,获得当前光栅所在移动台的位置信息并在 LCD 显示,实现载有标尺光栅的步进电机运动控制,从而完成标尺光栅与指示光栅的精确对准与零点定位。

3 光电转换电路设计及噪声分析

3.1 光电转换过程的电路设计

光电转换电路的性能直接影响系统的定位精度和可靠性。为避免光电转换电路中模拟信号对数字电路的影响,将模拟电路与数字电路分开设计。对于光电转换电路,最重要的参数为信噪比。影响信噪比的因素很多,如光源性能、系统机械振动、机械蠕变、空气杂质、光电转换倍率、电路温漂、噪声等。若不考虑电路因素以外的影响,电路自身的光电转换倍率、元件热噪声是该光电转换电路的主要设计参数。将二维零位光栅的光强信号转换成 0~10 V 内的电压信号,并力图使信噪比能达到 1 000 倍以上,即噪声信号应小于 10 mV。元件热噪声等高频噪声可以通过低通滤波电路实现,对温漂的约束可以采用差分电路以及高性能的反馈元件。据此,光电转换电路可分为光电传感器、前置放大电路和低通滤波电路,如图 3 所示。

3.2 光电转换过程的噪声分析

3.2.1 前置放大电路的噪声分析

光电转换过程中的噪声来自于各元件,如光电二极管、反馈电阻、有源放大器等,每种元件有其不同的噪声特性。

光电二极管散粒噪声电流:

$$(\Delta f=200 \text{ Hz}, q=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}, \text{假设 } I_d + I_p = 0.536 \mu\text{A})$$

$$i_{n(\text{shot})} = \sqrt{2q(I_d + I_p)\Delta f} = 5.8 \times 10^{-12} \text{ A. (1)}$$

光电二极管热噪声电流:

$$(k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, T = 298 \text{ K}, R_{sh} = 50 \text{ G}\Omega)$$

$$i_{n(\text{temp})} = \sqrt{4kT\Delta f/R_{sh}} = 8.1 \times 10^{-15} \text{ A. (2)}$$

反馈电阻热噪声电流:( $R_f=20\text{ M}$ )

$$i_{n(fb)} = \sqrt{4kT\Delta f/R_f} = 4.1 \times 10^{-13}\text{ A.} \quad (3)$$

放大器噪声电流:

$$(i_n = 0.35\text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}, e_n = 10.5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}})$$

$$i_{n(amp)} = \sqrt{i_n^2 \Delta f + e_n^2 (1/R_{sh} + 1/R_f)^2 \Delta f} = 5.0 \times 10^{-12}\text{ A.} \quad (4)$$

于是,噪声电压计算如下:

$$U_n = R_f \times \sqrt{i_{n(shot)}^2 + i_{n(temp)}^2 + i_{n(fb)}^2 + i_{n(amp)}^2}$$

$$= R_f \times 7.6 \times 10^{-12} = 153\text{ }\mu\text{V.} \quad (5)$$

同时,输出有效信号如下:

$$U_s = R_f I_d = 10.72\text{ V.} \quad (6)$$

信噪比计算得:

$$S/N = U_s/U_n = 6.99 \times 10^4. \quad (7)$$

以上计算忽略了闪烁噪声。由式(4)可以看出,反馈电阻  $R_f$  越大,前置放大电路的噪声电流越小,故信噪比也越好。式(7)的计算结果表明,前置放大电路的噪声影响很小。在 AD 采样只有 12 位细分的情况下,这样的噪声完全可以忽略。

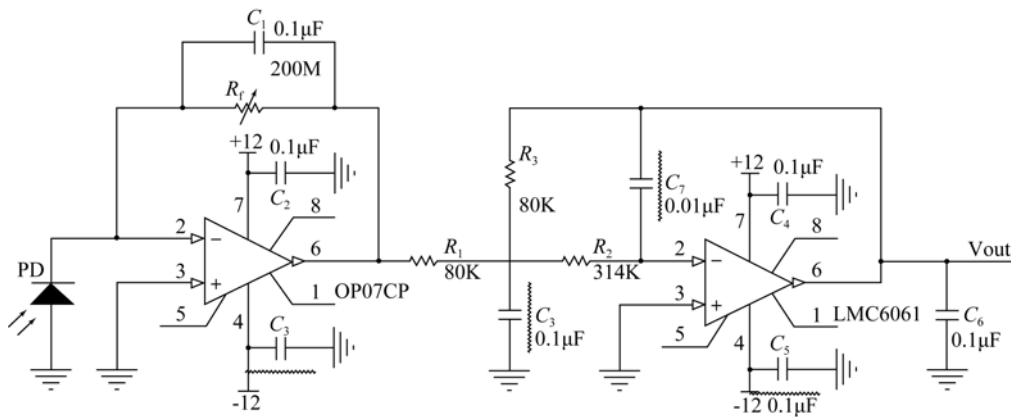


图 3 光电转换电路

Fig. 3 Photoelectric conversion circuit

### 3.2.2 低通滤波电路噪声分析

图 3 中运算放大器选用 OP07CP,此种运算放大器偏置电流很低,同时具有很小的噪声特性。其噪声电流为:

$$i_{n(amp)} = \sqrt{i_n^2 \Delta f + e_n^2 [1/(R_1 + R_{out}) + 1/R_2]^2 \Delta f}$$

$$= 2.04 \times 10^{-11}\text{ A.} \quad (8)$$

式(8)中  $R_{out}$  是前级放大器 OP07 的输出阻抗,于是:

$$u_{n(amp)} = (R_3/R_1) \times R_2 i_{n(amp)} = 6.4\text{ }\mu\text{V.} \quad (9)$$

而  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  的热噪声如下:

$$u_{n(R_1)} = (R_3/R_1) \times \sqrt{4kT\Delta f R_1} = 0.51\text{ }\mu\text{V.} \quad (10)$$

$$u_{n(R_2)} = (R_3/R_1) \times \sqrt{4kT\Delta f R_2} = 1.0\text{ }\mu\text{V.} \quad (11)$$

$$u_{n(R_3)} = \sqrt{4kT\Delta f R_3} = 0.51\text{ }\mu\text{V.} \quad (12)$$

### 3.2.3 光电转换过程的总体性能

两级电路的总噪声叠加计算如下:

$$u_{n(out)} = \sqrt{u_{n(amp)}^2 + u_{n(R_1)}^2 + u_{n(R_2)}^2 + u_{n(R_3)}^2 + u_{N_1}^2} = 153\text{ }\mu\text{V.}$$

同时输出有效信号:

$$U_s = (-R_3/R_1) R_f I_d = -10.72\text{ V.} \quad (14)$$

故整个光电转换电路的信噪比有:

$$S/N = |U_s/U_n| = 6.99 \times 10^4. \quad (15)$$

由此可见,光电转换电路的信噪比仍主要由前一级决定,第二级滤波电路自身噪声影响很小。

## 4 定位系统数字控制电路及控制算法

### 4.1 数字控制电路

数字控制电路需实现数据采集、显示和运动控制等功能,由光电转换电路发出的电压信号由一个 AD 转换器转换,之后在 CPU 内进行相关运算,进行累加、平均值滤波、比较,之后发出控制指令对步进电机进行控制。CPU 将采集的信号在显示器上进行输出,并显示当前的控制对准情况。步进电机的控制需要一个两相步进电机控制器发出二相步进脉冲,这意味着 CPU 是通过控制控

制器来控制步进电机的,所以对控制器的驱动必需使用输出缓冲器或者三极管。系统设备选择如下:单片机 ATmel89S52、12 位 AD 转换器

AD1674/MAX574、液晶显示器 LCD1602、串口缓冲器 MAX232 以及其他附属芯片。具体电路设计如图 4 所示。

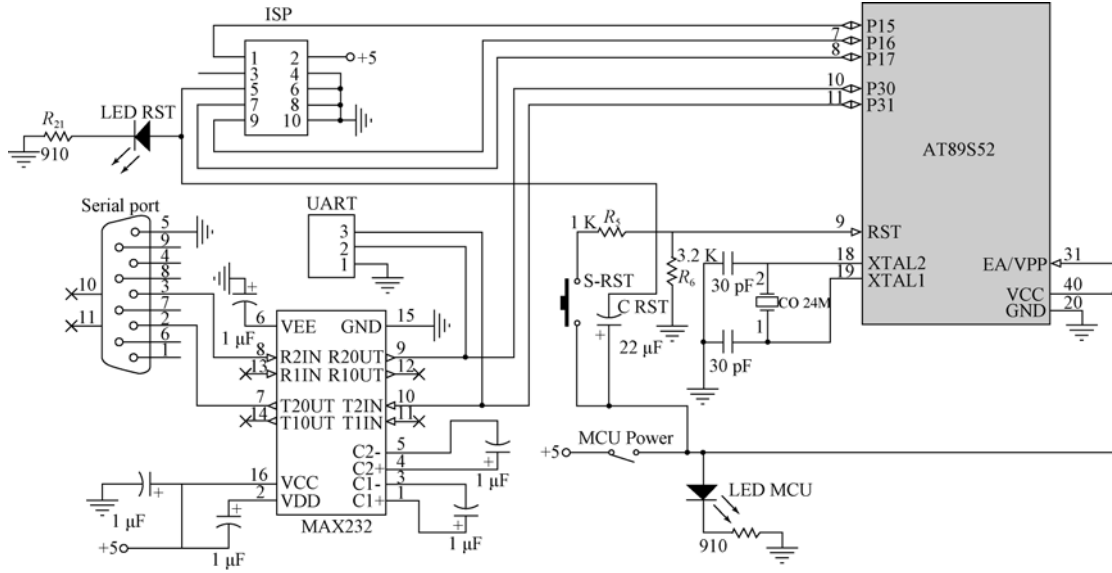


图 4 二维零位光栅定位系统单片机外围电路与串行口通信电路  
Fig. 4 Chip peripheral circuits and serial port communication circuit

### 4.2 光栅对准控制算法

二维零位光栅对准主要是寻找最大光强的位置。定位算法有两种,一种是全局式扫描搜索;另一种是同步式扫描搜索。全局扫描算法试图对二维零位光栅所有位置进行扫描,找到最大光强位置,从而确定中心零位的位置。该方法能找到系统零位,但需要较长的扫描时间。同步式扫描在扫描过程中就能判断出当前的位置,是不断向零位靠近的方法。该方法因为反复在当前位置与前面的位置进行比较而确定扫描方向,从而使找到零位的速度大幅提高。为提高系统稳定性,可以把二维零位光栅的有效定位位移平均分成  $n$  段,将一段区域内的光强分布在位移上积分,则包含零位的中间一段区域因为跨越了多个次级峰,使得单个峰的影响被减小,其光强在位移上的积分则将大于远离零位的区域。算法如图 5 所示,设置初始步数为  $n$ ,并将对准过程剖分成 X 向对准与 Y 向对准 2 个过程,先进行 X 向的对准,再进行 Y 向的对准,从而实现二维对准。定位过程为:判断前后 2 次位置的光强大小,如果大则继续刚才的方向前进,否则将步数减半,前进方向改为刚才的反方向,如果步数减小到最小值,则判定为定位成功。理论上只要  $n$  取值合适,定位就会变得可靠。

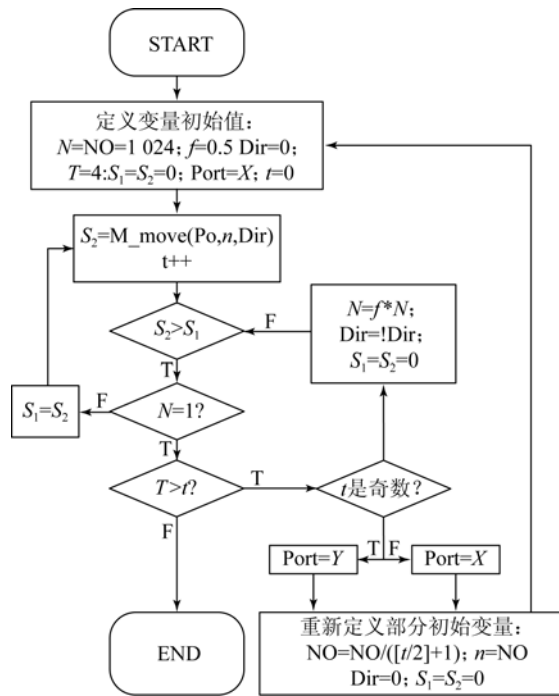


图 5 二维零位光栅自动定位算法流程图

Fig. 5 Flowchart of automatic positioning algorithm for two zero-reference gratings

#### 4.4 二维零位光栅定位精度分析

在零位附近的不确定性因素主要有电气噪声  $\delta_a$  与 AD 转换的采样误差  $\delta_d$ 。实验测得,平均输出电压在 8 V 附近,电气噪声  $\delta_a$  为  $\pm 10$  mV(即信噪比约为 400)。AD1674 的转换误差  $\delta_d = 1/2$  LSB。LSB 是 AD 转换数据的最低位,即有:

$$1 \text{ LSB} = \frac{10}{4 \times 095} \times 10^3 \text{ mV} = 2.44 \text{ mV}. \quad (16)$$

总的信号不确定度为:

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_c^2 + \delta_{ad}^2} = \pm 10.07 \text{ mV}. \quad (17)$$

通过在零位附近的光强分布的区域性线性拟合,由信号引起的位移不确定度为:

$$\Delta_c = \frac{5\delta}{8-0.8} = 7 \text{ nm}. \quad (18)$$

步进电机控制器可工作在  $128 \times 8$  细分模式,最小步距角为  $1.8^\circ$ ,丝杠导程为  $500 \mu\text{m}$ ,步进距离的不确定度为:

$$\Delta_m = \frac{1.8}{360 \times 128 \times 8} \times 500 \mu\text{m} = 2.5 \text{ nm}. \quad (19)$$

系统总的不确定度为:

$$\Delta = \pm \sqrt{\Delta_c + \Delta_m} = \pm 7.43 \text{ nm}. \quad (20)$$

## 5 实验结果及讨论

当标尺光栅与指示光栅完全对准时,将光栅的中心位置设为二维坐标原点。当电机驱动标尺光栅移动时,标尺光栅的中心位置将发生变化。将表 1 中 12 个位置作为标尺光栅的定位起始点,启动定位设备,测试最终找到零位的概率与精度。测试结果如表 1 所示。

由表 1 得出,若起始位置在以零点为中心,半径为  $2.5 \mu\text{m}$  圆形区域内,利用该套设备可以实现纳米量级的定位,可信度高;当起始位置在以零位为中心,半径为  $5 \sim 200 \mu\text{m}$  圆形区域内,利用该套设备,可以实现纳米量级的对准精度,但可能存在定位盲点,无法找到零位的情况。

经理论分析和实验对比得出,二维零位光栅零位定位速度与图 1(b)中光强分布具有很高的依赖性,无法找到零位也与光强的分布有关,系统出现定位失败主要由于存在多个次级峰。相关的

解决办法可以优化光栅编码,使其在扫描方向上透射光强具有单调变化趋势。另一种解决办法是通过改变扫描方式避开盲点对零位的干扰,当第一次定位失败后,可以考虑改变初始位置,重新定位,因为两次和两次以上概率均出现定位在盲点处的概率将大大降低。

表 1 不同初始位置下二维零位光栅定位结果

Tab. 1 Automatic positioning results of two zero-reference gratings at different initial positions

序号	初始位置/ $\mu\text{m}$	定位零位 时间/min	最终位置/ $\mu\text{m}$
1	[200,200]	4	零位
2	[200,-200]	3	零位
3	[-200,200]	N/A	[15,15]
4	[-200,-200]	N/A	[15,15]
5	[-150,-150]	3	零位
6	[150,150]	N/A	[15,15]
7	[150,-150]	4	零位
8	[-150,150]	4	零位
9	[2.5,2.5]	1	零位
10	[2.5,-2.5]	1	零位
11	[-2.5,2.5]	1	零位
12	[-2.5,-2.5]	1	零位

## 6 结 论

本文搭建了基于二维零位光栅的二维自动定位系统,克服了原有二维零位光栅只能在一维方向上实现定位的缺点,实现了二维零位光栅在二维方向上纳米级精度自动定位。实验及理论分析表明:系统定位速度对透射光强分布具有很高的依赖性,系统一次定位的成功率与初始位置密切相关。起始位置以零位为中心,半径为  $2.5 \mu\text{m}$  的圆形区域内可实现纳米量级定位对准。本文的工作在纳米制造及测量装备领域具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 王国彪. 纳米制造前沿综述[M]. 北京:科学出版社, 2009.  
WANG G B. *Summary Nanometer Manufacturing Frontier* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 刘震, 尚砚娜. 多尺度光点图像中心的高精度定位[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6):1586-1591.  
LIU ZH, SHANG Y N. High precision location for multi-scale light spot center [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1586-1591. (in Chinese)
- [3] 李伟, 高思田, 卢明臻, 等. 计量型原子力显微镜的位移测量系统(英文) [J]. 光学精密工程, 2012, 20(4):797-802.  
LI W, GAO S T, LU M ZH, *et al.*. Position measuring system in metrological atomic force microscope. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):797-802.
- [4] 朱江平, 胡松, 于军胜, 等. 光刻对准中掩膜光栅标记成像标定方法[J]. 中国激光, 2013.  
ZHU J P, HU S, YU J SH, *et al.*. Calibration method for mask grating mark imaging in lithography alignment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1):0108002. (in Chinese)
- [5] NIU D, LI J, CHEN Y, *et al.*. Comparative study on the nonperiodic and periodic gratings for scanning probe microscopy drift measurements[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2010, 28:1070-1072.
- [6] 周成刚, 叶锡标, 张阳, 等. 基于二维零位光栅的高精度平面定位系统[J]. 纳米技术与精密工程, 2006, 4(3):190-194.  
ZHOU C G, YE X B, ZHANG Y, *et al.*. A two-dimensional zero-reference grating-based high-precision planar positioning system[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2006, 4(3):190-194. (in Chinese)
- [7] SÁEZ-LANDETE J, ALONSO J, BERNABEU E. Design of two-dimensional zero reference codes by means of a global optimization method[J]. *Opt. Express*, 2005;13:4230-6.
- [8] SÁEZ-LANDETE J, SALCEDO-SANZ S, ROSA ZURERA M, *et al.*. Design of two-dimensional zero reference codes with a genetic algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31:1648-50.
- [9] CHEN J C, WANG S H, LEE M K, *et al.*. Cross-entropy method for the optimization of optical alignment signals with diffractive effects[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, 29:2706-14.
- [10] ZHOU W Y, CHEN Y H, HUANG W H. Alignment measurement of two-dimensional zero-reference marks[J]. *Precision Engineering*, 2006, 30: 238-41.
- [11] SÁEZ-LANDETE J, SALCEDO-SANZ S, CRUZ-ROLDÁN F, *et al.*. Design of two-dimensional optical alignment signals robust to diffractive effects[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, 26: 1702-7.
- [12] SU Y S, TONGUZ O K. Robust design of two-dimensional optical reference signals against diffraction effects[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, 30:2168-75.

## 作者简介:



李家文(1971—),男,安徽舒城人,博士,2011年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事微纳米加工和测量技术、结构色机理与加工技术等方面研究。E-mail:jwl@ustc.edu.cn

## 通讯作者:



褚家如(1963—),男,安徽六安人,教授,博士生导师,1985年于中国科学技术大学获学士学位,1999年入选中国科学院“百人计划”。主要从事微机电系统技术、超精密测量、超精密天文仪器方面研究。E-mail:jrch@ustc.edu.cn