

调平聚焦伺服控制系统的优化设计

宗永红^{1,2}, 周常河¹, 麻健勇¹, 王 津^{1,2}, 卢炎聪^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 以提高共焦差动并行激光直写中光束刻写质量为目标, 分析设计了调平聚焦伺服控制系统。采用柱面镜作为像散元件, 与四象限光电探测器结合, 利用差动像散检测方法和比例积分微分(PID)反馈算法减少光源和外部干扰的误差, 获得高灵敏度、高精度、高稳定性的探测曲线。通过优化光学设计参数, 本系统能获得具有高灵敏性与一致稳定性的探测曲线, 探测范围为 3 μm , 静态聚焦误差可达 $\pm 5.0 \text{ nm}$; 动态聚焦压电陶瓷(PZT)伸长量可保证在焦深范围内, 焦点位置辨别精度可达纳米量级, 可探测调平台的倾斜角和俯仰角在 0.01 mrad 左右。利用该系统可实现光栅的刻写, 进一步为更大尺寸、更高密度的光栅刻写提供依据。

关键词 测量; 光栅; 调平调焦; 参数优化; 差动像散; 反馈控制

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0122001

Optimized Design of Leveling and Focusing Servo Control System

Zong Yonghong^{1,2}, Zhou Changhe¹, Ma Jianyong¹, Wang Jin^{1,2}, Lu Yancong^{1,2}

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronics Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A leveling and focusing servo control system is built to improve the focus accuracy of the differential parallel confocal laser direct writing system. To obtain a detection curve with high sensitivity, accuracy and stability, the cylindrical lens as an astigmatism element is combined with four-quadrant photodetector, and the differential astigmatism detection method and proportion integration differentiation(PID) feedback algorithms are employed to reduce errors caused by light source and external interference. By optimizing the optical parameters, the detection curve with high sensitivity and stability has been obtained, with a range of around 3 μm and a static focusing error of $\pm 5.0 \text{ nm}$. The stretching of piezoelectric ceramic transducer(PZT) can be guaranteed within the depth of focus range in the dynamic mode. Nano-scale precision of the focal position can be achieved, and the tilt and pitch of lever adjuster approximate 0.01 mrad. Utilizing this system, gratings can be fabricated, and this system can provide reference for the fabrication of larger-size and higher-density gratings in the future.

Key words measurement; grating; leveling and focusing; parameter optimization; differential astigmatism; feedback control

OCIS codes 050.2770; 080.1010; 090.1000; 150.5495

1 引 言

激光直写技术是一种无需掩模的新型光刻技术^[1-3], 该技术以其低成本、低要求、多功能等优势一直被广泛应用于加工掩模、衍射光学器件^[4-5]等不同的领域。但是, 在刻写过程中, 尤其是在大面积、高密度光栅掩模的刻写过程中, 如何提高刻写精度, 保证线条的均匀与线条的刻写质量是一个难题。由于刻写的光栅尺寸大, 精度要求高, 因此, 必须设计灵敏度高、一致性好的调平聚焦伺服控制系统。聚焦伺服控制系统的核心是

收稿日期: 2016-07-15; 收到修改稿日期: 2016-09-06

基金项目: 国家科技部项目(2012YQ170004)、国家自然科学基金(61307064)

作者简介: 宗永红(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光栅制造方面的研究。E-mail: zongyongh16@163.com

导师简介: 周常河(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光栅制造与衍射光学理论、测量等方面的研究。

E-mail: chazhou@mail.shenc.ac.cn(通信联系人)

焦点检测技术^[6-7]。目前聚焦控制系统中的自动调焦方法有多种,包括临界角法^[8]、针孔法^[9]、像散法等。像散法作为一种常见的调焦手段,其光学系统简单,测量灵敏度高,损失光能少,便于实时地实现对被测物体微位移变化的精确测量^[10-13]。

目前国内外关于利用差动像散法进行离焦检测技术的研究比较广泛,其中哈尔滨工业大学利用此技术设计出了差动像散离焦检测实验装置^[14]和基于单向离焦的差动像散检测实验装置^[15]。但是对于大面积衍射光栅^[16-17]的刻写,由于在平台移动过程中,平台的倾斜度对实验影响较大,并且原有的差动像散装置不足以满足大尺寸高精度光栅的刻写要求,故本文的实验装置在差动像散检测原理的基础上,加入调平模块,进行了光路设计,调平模块可以根据四象限光电探测器上基片反射光的位置,推断出基片台的倾斜角和俯仰角,避免了刻写过程中出现的离焦现象。

本文以提高大面积光栅的刻写线条质量、提高像散曲线灵敏度与聚焦位置的辨识精度为目标,分析设计了调平聚焦伺服控制系统^[18-19]。该系统不仅保留了传统像散法检测技术灵敏度高、易于实现的优点,同时克服了光源和周围环境随机波动对调焦系统带来的干扰,从而保证了整个系统在长时间的刻写过程中始终能将调焦镜头锁定在焦深范围内。该系统可用于多光束激光直写装置^[20]来刻写大面积光栅,实验表明本系统装置能获得良好的稳定性与灵敏度探测曲线,测量精度可达到纳米量级。

2 像散法

2.1 像散法基本原理

光学像散法的基本原理图如图 1 所示:其中, f_1 为物镜的焦距; r_1 为物镜的口径半径; f_2 为柱面镜的焦距; r_2 为柱面镜的口径半径; n 为柱面镜与四象限光电探测器(PSD)之间的距离; l_1 代表物镜与柱面镜之间的距离; a 为物镜与被测物体表面之间的距离; m 为柱面镜的像距, l_2 为物镜的像距, b 为柱面镜的物距。

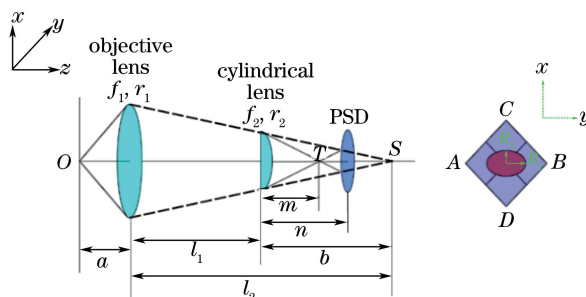


图 1 单个像散基本原理图

Fig. 1 Basic schematic diagram of single astigmatic

假设 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别为光电探测器第一、二、三、四象限输出的光强信号,则离焦误差信号(FES)如下式^[15]所示:

$$F_{ES} = \frac{(S_1 + S_3) - (S_2 + S_4)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}, \quad (1)$$

假设 C_2 为光电转换系数,则单个像散输出的 FES 为^[14]:

$$F_{ES} = C_2 \left[1 - \frac{4}{\pi} \arcsin \left(\frac{|r_y|}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \right) \right], \quad (2)$$

式中 r_x 和 r_y 分别为四象限光电探测器上椭圆光斑的长轴和短轴,将光学参数 f_1 、 f_2 、 n 、 l_1 代入(2)式,利用 Matlab 软件仿真可得到不同光学参数下 FES 随离焦量(X)的变化关系,如图 2 所示。

由图 2 可知,在零点附近,FES 和 X 大体呈线性关系,并且光学参数不同时,曲线的灵敏度不同。因此根据像散法原理可知,在以零点为中心的一段对称的线性区域内,可以根据 FES 的大小来得到被测物的离焦量 X 的大小和方向。

2.2 差动像散法

在像散法的基础上,分别利用 2 个柱面镜和 2 个四象限光电探测器,并将探测器分别位于柱面镜的焦前

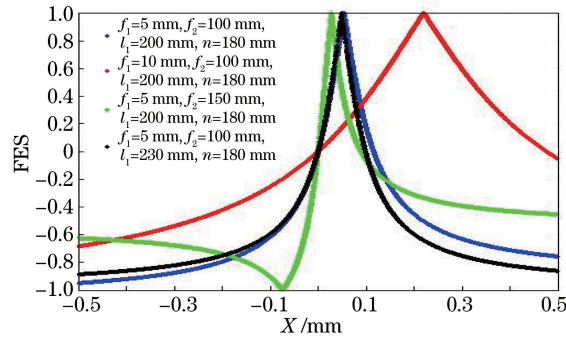


图 2 不同光学参数下,离焦误差随 X 变化曲线

Fig. 2 Defocus error versus X under different optical parameters

与焦后相同的位置处,构成差动像散检测,在像散法理论的基础上,可以得到差动像散法的 FES。

根据激光束光学建立的差动像散法检测系统数学模型如下,首先,将差动像散光路中的一路光路展开,如图 3 所示。图 3 中, f_1 为物镜的焦距, f_2 为柱面镜的焦距, X 为离焦量, l_1 为聚焦物镜与柱面镜之间的距离, l_2 为柱面镜与探测器之间的距离。

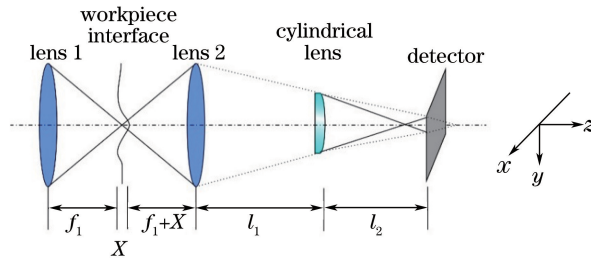


图 3 单光路展开示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single optical path

设探测器面上 x 、 y 方向的复曲率半径分别为 q_x 、 q_y , 根据 ABCD 定则, 可得:

$$q_x = \frac{[-f_1^2 - 2X(f_1 - l_1 - l_2)] \times q_0 + 2f_1(f_1 + X)(f_1 - l_1 - l_2) + (l_1 + l_2)f_1^2}{2X \times q_0 - 2Xf_1^2 - f_1^2}, \quad (3)$$

$$q_y = \{[(f_2 - l_2)(2l_1X - 2Xf_1 - f_1^2) + 2l_2f_2X] \times q_0 + f_1(f_2 - l_2)(2f_1^2 + 2Xf_1 - 2l_1X - l_1f_1) - f_1f_2l_2(f_1 + 2X)\} / \{[f_1^2 + 2Xf_1 + 2X(f_2 - l_1)] \times q_0 - 2f_1^2(f_1 + X) - f_1(f_2 - l_1)(f_1 + 2X)\}, \quad (4)$$

式中 q_0 为入射到物镜上的高斯光束的复曲率半径。推导出探测器上的光斑在 x 、 y 方向上的半径分别为

$$\begin{cases} \omega_x = \sqrt{-\frac{\lambda}{\pi \text{Im}(1/q_x)}} \\ \omega_y = \sqrt{-\frac{\lambda}{\pi \text{Im}(1/q_y)}} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $\text{Im}()$ 表示虚部。

探测器 A、B 到柱面镜的距离分别为 l_{11} 、 l_{12} , 综合(3)~(5)式, 可得到探测器 A、B 上的光斑半径分别为 ω_{Ax} 、 ω_{Ay} 和 ω_{Bx} 、 ω_{By} 。则差动像散法检测的 FES 为

$$F_{ES} = \frac{4}{\pi} \left[\arctan\left(\frac{\omega_{Ax}}{\omega_{Ay}}\right) - \arctan\left(\frac{\omega_{Bx}}{\omega_{By}}\right) \right]. \quad (6)$$

由上述可知, FES 由两个探测器上的光斑半径之比决定, 且 FES 和 X 的关系主要取决于光学系统参数的选择^[21]: 聚焦物镜和柱面镜的焦距(f_1 、 f_2)、聚焦物镜与柱面镜的距离(l)、柱面镜和两个探测器之间的距离(l_{11} 、 l_{12}), 探测器到柱面镜焦平面的距离(m)。根据上述分析, 利用 Matlab 软件仿真, 分别得到 FES 与 X 之间的对应关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 利用差动离焦像散检测时, 系统的灵敏度与 f_1 、 f_2 、 l 和 m 有不同的关系:

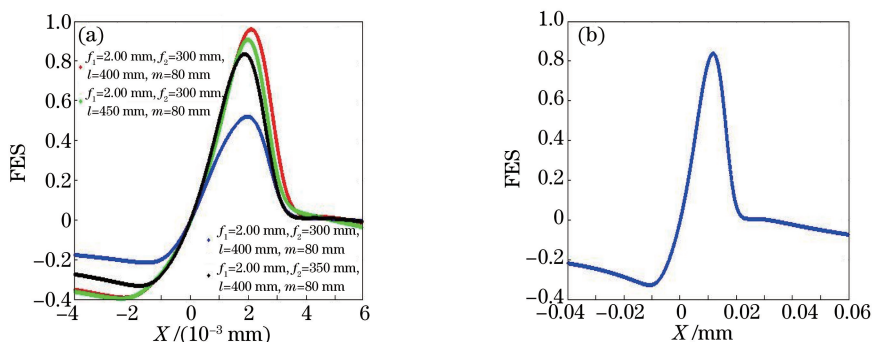


图 4 FES 与 X 之间的对应关系曲线。(a) 不同光学参数时的误差曲线; (b) $f_1=5.00$ mm, $f_2=350$ mm, $l=400$ mm, $m=80$ mm 时的误差曲线

Fig. 4 Corresponding relationship curves between FES and X . (a) Error curve with different optical parameters; (b) error curve with $f_1=5.00$ mm, $f_2=350$ mm, $l=400$ mm, $m=80$ mm

- 1) 系统灵敏度与 f_1 、 m 成负相关, 与 l 、 f_2 成正相关, f_2 越大, 灵敏度越高, 但相应的测量范围会变小;
- 2) f_1 与 f_2 对系统灵敏度的影响程度要大于其他参数对系统灵敏度的影响。

3 系统光路设计

由上述分析可知, FES 和 X 的关系主要取决于光学系统参数的选择。根据系统测量范围小, 系统灵敏度高和探测曲线一致性好等一系列要求, 根据图 4, 再结合实际光学元件制造工艺要求, 确定了一套光学参数, 分别为: $f_1=2.00$ mm, $f_2=300$ mm, $l=400$ mm, $l_{11}=380$ mm, $l_{12}=220$ mm。搭建系统结构如图 5 所示。本系统中包括红光调平和自动聚焦模块, 系统采用的是平场复消色差短焦镜头, 共轭距离为无穷远, 675 nm 的平行光束会聚在样品的光敏感层上, 经其反射后, 由分束镜分为两束光, 反射的光构成调平模块, 根据传感器上光斑的分布情况可以确定样品台的倾斜和俯仰的程度。假定传感器的探测精度在 $5 \mu\text{m}$ 以内, 如果传感器距离干涉成像面的距离为 500 mm, 对应的可探测调平台的倾斜和俯仰在 0.01 mrad 左右, 样

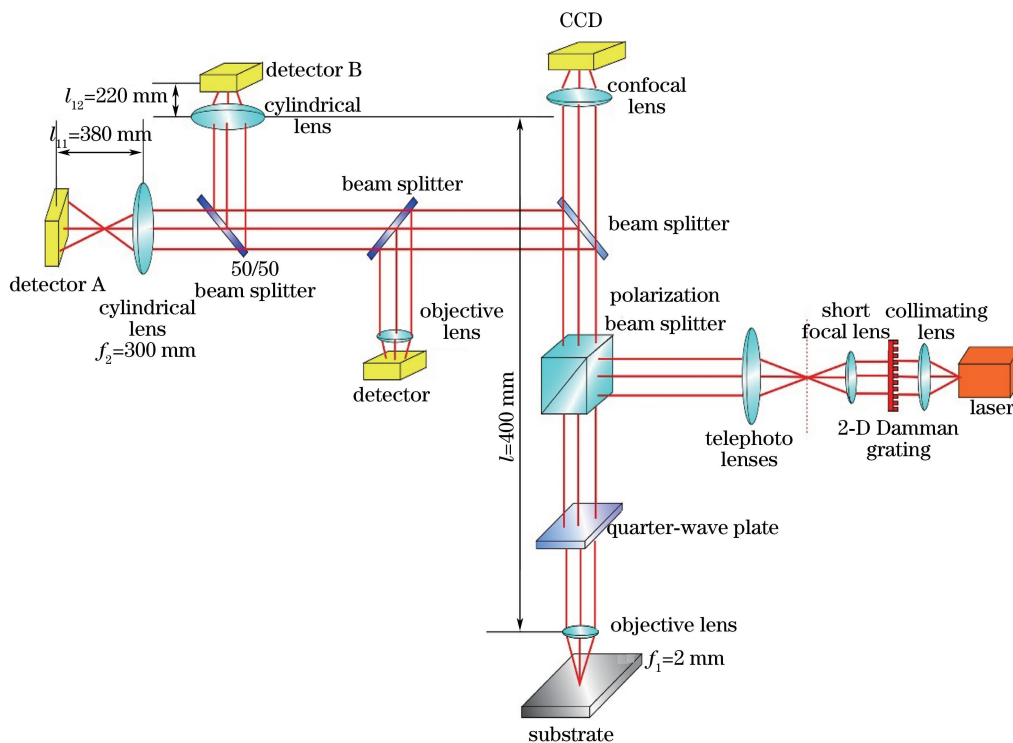


图 5 光路示意图

Fig. 5 Schematic of optical system

品在 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的移动范围内,最大倾斜和俯仰在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右,可以在整个样品范围内成功地实现自动聚焦。透射的红光被均分为两路,分别经过柱面镜到达传感器(四象限光电探测器)表面,构成自动聚焦模块。本系统结构分别采用差动和单向像散测量法时的 FES 和 X 的关系如图 6 所示。由图 6 可知,单向像散测量法 X 的变化范围为 $-5 \sim 3\text{ }\mu\text{m}$, FES 在 $-0.8 \sim 1$ 之间,而利用差动像散检测法时, X 在 $-1 \sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 之间变化, FES 可在 $-0.3 \sim 0.7$ 之间变化,相比于单向测量法,差动测量法 X 的变化范围更小,曲线平滑性更好,灵敏度与一致性更好。

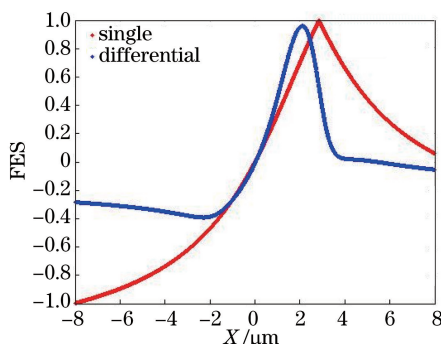


图 6 FES 与 X 仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of FES and X

4 控制实现

本系统可分为调平和调焦两个独立模块,聚焦执行器件为压电陶瓷(PZT),其行程能达到 $400\text{ }\mu\text{m}$,并且扫描和定位分辨率高,可达到亚纳米量级,响应速度快,线性度非常好。镜头安装在 PZT 上,整个自动聚焦模块安装在稳定性极高的支架上,避免由于样品移动带来的振动。在电压驱动下,PZT 可带动长镜头沿 Z 向以纳米级精度运动。

调平模块主要是依据 CCD 上二维点阵的清晰程度来手动操作完成的,是为调焦模块做准备的,其目的是增加调焦的准确性和提高调焦的效率,一旦完成调平模块进入调焦模块后,调平模块就不再运行。

首先进行调平模块,为了实现快速调平,如图 5 所示,采用二维达曼光栅,由转接透镜组将其转接成像于短焦镜头的入瞳位置,通过短焦镜头聚焦于样品的表面,并在其上形成二维的点阵分布,反射光经过宽带偏振分光镜最终共焦成像于 CCD 的表面,只有当样品台位于刻写光路短焦镜头的焦平面位置时,反射光才能在大光敏面的 CCD 上成清晰的像,因此可以通过 CCD 上二维点阵的清晰程度快速判断样品台是否已经被调整到位。当二维点阵少数点清晰时,此时调平没有达到要求,手动调节平台,直到二维点阵绝大多数点清晰时,才能确定已经大致调节到位。采用调平模块避免了在大尺寸光栅刻写过程中出现离焦现象,提高了最终刻写光栅线条的均匀性;并且加入调平模块后,避免了 PZT 的 Z 向伸长量的大范围变化,缩短了 PZT 的响应时间,从而提高了平台移动速度,进一步缩短了光栅刻写所需的时间,提高了效率。调平达到要求后运行调焦模块,在调焦模块中进行实时离焦检测从而实现实时聚焦。

自动聚焦系统是聚焦光斑能否始终锁定在显微物镜焦平面的关键,直接影响最终条纹的质量。系统中含有许多任务:参数配置、事件触发、状态执行。为使系统正常运行,不同任务间不相互干扰,利用 LabVIEW 软件实现对各个任务的控制,控制流程如图 7 所示。

本系统中触发事件为:外界激光范围值改变、目标 FES 和比例积分微分(PID)参数值改变、开始扫描事件、停止扫描(开始自动聚焦)事件、前面板关闭事件和 stop 事件。

本系统的状态有:初始化状态、扫描状态、自动聚焦状态、离焦状态。系统上电后默认为初始化,后执行扫描状态,在没有外界事件触发时,一直处于该状态;当停止扫描(开始自动聚焦)事件触发时,系统进入自动聚焦状态,刻写运动平台运动,此时状态称为动态状态,产生的误差称为动态误差,该误差与平台移动速度、PZT 分辨率、PID 参数等因素有关,当误差达到一定数值时进入离焦状态,系统停止运行。

自动聚焦模块采用 PID 算法进行实时反馈控制,其原理如图 8 所示。在刻写过程中,由于平台震动、外

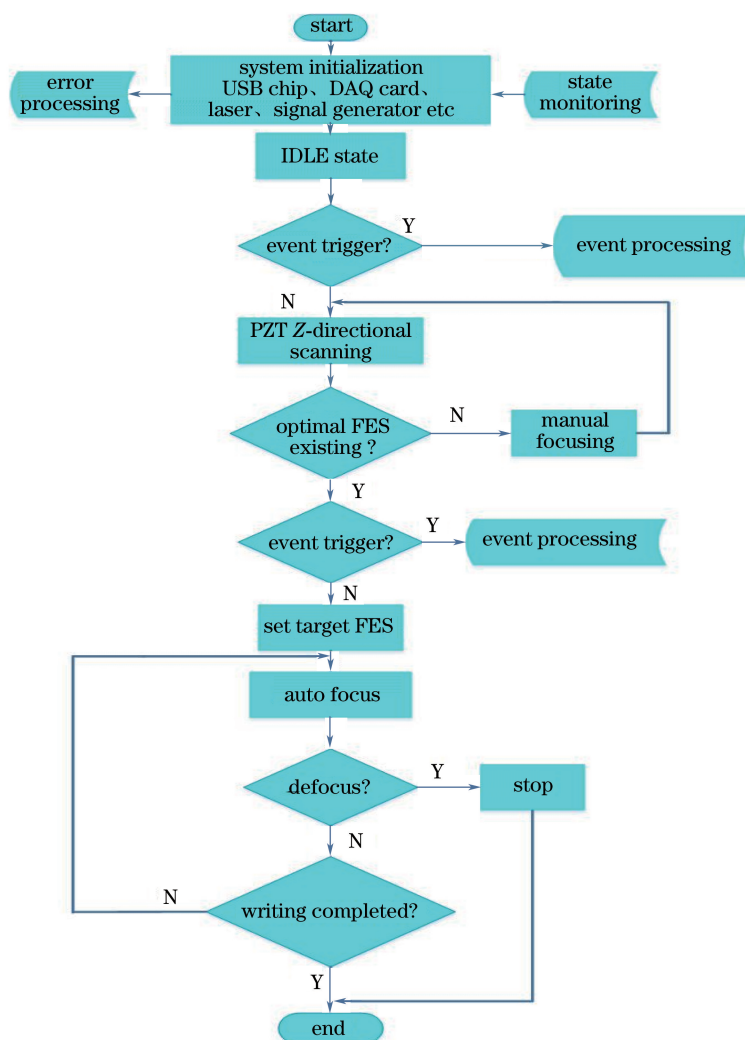


图 7 系统控制流程图

Fig. 7 Control flow chart of the system

界环境等因素的影响,相对于基准位置可能产生一定的离焦,通过 LabVIEW 软件编程得到相应的离焦误差量,将该离焦误差量作为 PID 反馈算法的输入,得到 PZT 的 Z 轴的新位置,输出驱动电压,驱动 PZT 进行 Z 向移动到新位置,达到基准位置。由于 PZT 的响应速度快,能精确调焦,根据 PID 控制计算结果,改变 PZT 的伸长量,循环反馈实现实时聚焦和对刻写线条的实时锁定,直至系统停止。

5 实验结果

由上述分析可知,实验辨别精度主要取决于探测曲线在零点附近的线性区域的灵敏度与稳定性,为此,进行实验验证,得到不同情况下的曲线来评估系统的优越性。在已搭建的单向像散聚焦的实验平台基础上^[22],根据图 5 搭建本系统实验平台,利用 LabVIEW 软件编程实现伺服聚焦系统的人机交互。

当气浮平台以 60 mm/s 的速度运动进行刻写时,本系统(差动)实验过程测得的控制软件人机交互界面(动态)如图 9 所示,原来的实验系统(单向)的实验 FES 曲线如图 10 所示。而当气浮平台没有运动时,利用本系统测得的控制软件人机交互界面(静态)如图 11 所示。

由于光电探测器的安装与原系统(理论计算)采用的探测器象限位置相反,故图 9 左下角离焦曲线与原系统实验 FES 曲线(图 10)形状不同,但其本质是一样的。

在图 9、图 11 的人机交互界面,左上角窗口红色线表示探测器接收到的反射红光能量在 Z 向扫描范围内的大小;左边中间窗口为实时显示的 FES 曲线,横坐标表示压电陶瓷 PZT Z 向扫描的扫描行程,单位为

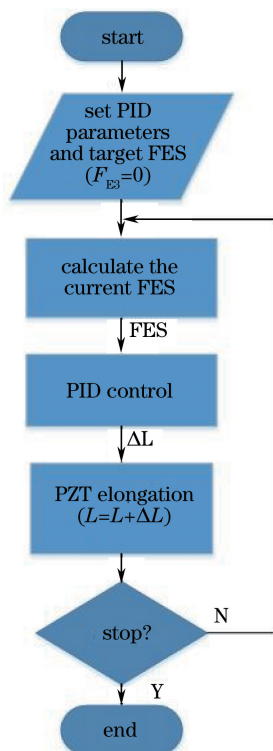


图 8 自动聚焦模块 PID 控制算法原理图

Fig. 8 Principle diagram of PID control algorithm in automatic focusing module

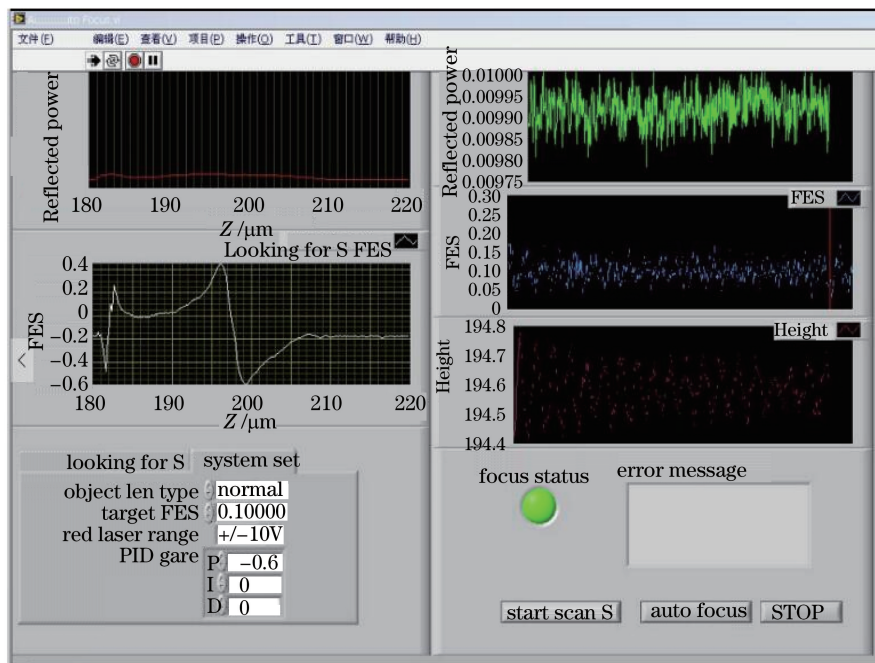


图 9 系统动态自动聚焦模块界面

Fig. 9 Interface of system dynamic autofocus module

μm , 这里采用的 PZT 可以在 $0\sim 400\ \mu\text{m}$ 范围内连续扫描; 右边中间为目标 FES 大小以及实际 FES 实时大小变化; 右下角窗口为聚焦 PZT 的实时伸长量(单位为 μm)。工作过程为: 根据实验需求与误差校正量设定好目标 FES 大小, 设置合适的 PID 控制参数值, 然后点击自动聚焦按钮进行自动聚焦工作。另外在刻写过程中可以随时直接调整目标 FES 大小值来控制刻写焦点的位置, 不需要中断刻写过程, 这一特点在刻写具有不同特征线宽的同一个图形时非常重要。

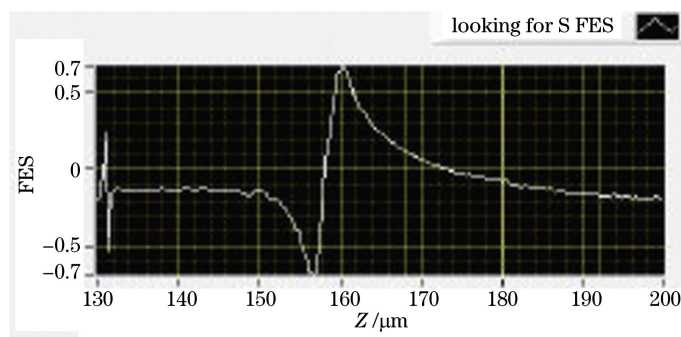


图 10 原系统实验结果

Fig. 10 Experimental result of initial system

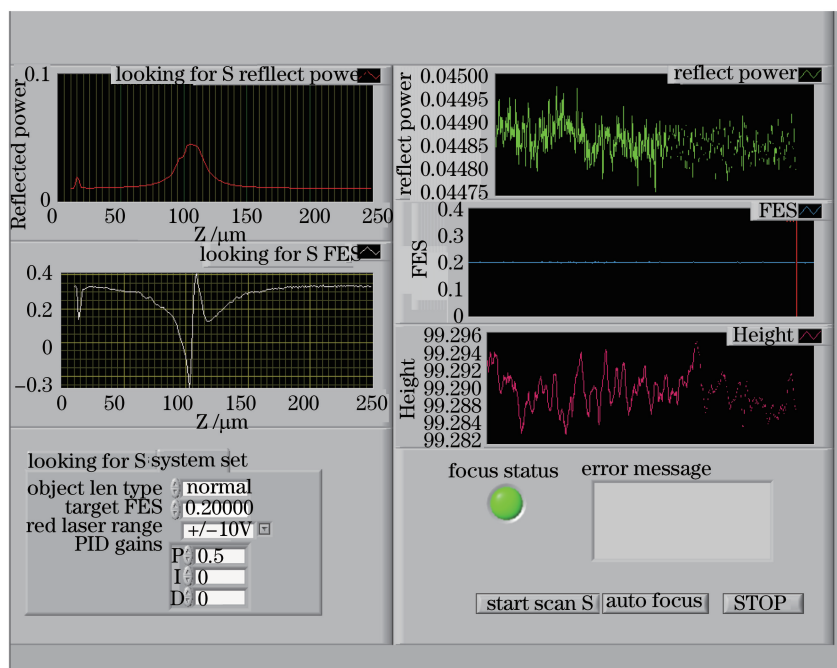


图 11 系统静态自动聚焦模块界面

Fig. 11 Interface of system static autofocus module

由图 9 左边中间 FES 曲线可知: FES 在 $-0.6 \sim 0.4$ 之间, 并且曲线有很好的线性度, 线性范围窄, 线性量程为 $3 \mu\text{m}$ 左右, 利用高精度激光干涉仪作为测量仪器, 实验可得聚焦误差(动态误差)约为 30.0 nm , 与理论结果(图 6)基本相符。而在图 10 中, 原实验探测曲线的 FES 可在 $-0.7 \sim 0.7$ 之间, 其探测范围约为 $4.8 \mu\text{m}$, 聚焦误差可达 34.3 nm 。相比于原单向系统, 本系统精度得到了一定的提高, 引入的差动可以减小光源由于长时间工作带来的误差, 并且本系统额外引入调平光路, 可推断出基片台的倾斜角和俯仰角并保证整个基片在刻写范围内样品的倾斜和俯仰在一定范围内。

系统动态工作(图 9)时, FES 在 0.1 左右时具有良好的线性段, 刻写时目标 FES 为 0.1 , 实时得到的 FES 以 0.1 为中心上下摆动, 波动范围约为 $0.05 \sim 0.15$; 在焦深范围内 PZT 的实时伸长量也相对较大, 伸长范围约为 300 nm , 开始最大可达 400 nm 。而静态工作时, 由图 11 可知, FES 在 0.2 左右时具有良好的线性段, 实时 FES 围绕 0.2 的波动非常小, 基本保持在 0.2 ; 但由于平台震动、周围环境等因素的影响, 实际 PZT 实时伸长量有一定的变化, 其变化范围非常小, 约为 10 nm 。相比于静态工作, 动态工作的误差较大, PZT 在焦深范围内的变化范围也比较大, 这与气浮平台的运动速度和 PID 参数等因素有很大的关系。一方面, 在一定速度范围内, 气浮平台运动速度越大, 平台震动会越严重, 导致动态误差越大, 并且由于刚开始运动时, 平台不稳、震动相对严重等因素使开始时得到的实时 FES 变化比较大; 另一方面, PID 反馈算法及参数的选择对误差也有一定的影响。PZT 可视为一个二阶振荡环节, 控制算法、参数选择等因素会对系统上升时间、超调

量、稳态误差等特性产生很大的影响。考虑到计算量和本系统要求 PZT 运动为变化量并非绝对位置,本系统采用增量式 PID 算法,利用目标 FES 周围的线性段,PZT 在该段范围内具有相对较好的线性特性,只设置了比例参数 K_p ,当 K_p 参数不同时,会有相应的稳态误差, K_p 参数增大,系统的动作灵敏,速度加快,稳态误差减小;但 K_p 偏大时,振荡次数增多,调节时间增长。由于稳态误差较小,PZT 的惯性(滞后)较弱,故没有设置积分微分参数。在刻写过程中,也应根据实际情况与经验适当调节参数,使其满足要求。但无论是静态工作还是动态工作,PZT 的实时伸长量都可在焦深范围内。

由图 9、图 11 可以得出:本实验搭建的调平自动聚焦系统满足激光直写的要求,该系统具有很好的灵敏度,满足系统纳米级误差的要求。并且相比于原来的系统,本系统的灵敏度更高,聚焦误差更小,精度更高,极大地优化了原来的系统。

本课题组采用共焦差动并行激光直写技术,利用该系统和现有的达曼光栅,通过旋转进行刻写可以直写出不同且连续的周期结构;另外通过直写刻写能量配合直写速度可对刻写线条的线宽进行调制,因此可以刻写不同周期、不同占空比的光栅结构。

图 12 (a)为通过分束比为 1×25 、发散角为 0.74 mrad 的达曼光栅分束刻写出的线宽为 750 nm 、周期为 $1.5 \mu\text{m}$ 的铬光栅模板条纹显微镜图片,该光栅占空比为 0.5 ,其刻写是利用 $50 \times$ 、数值孔径为 0.6 、焦距为 4.0 mm 的显微物镜完成的,此时达曼光栅的旋转角度为 59.55° 。

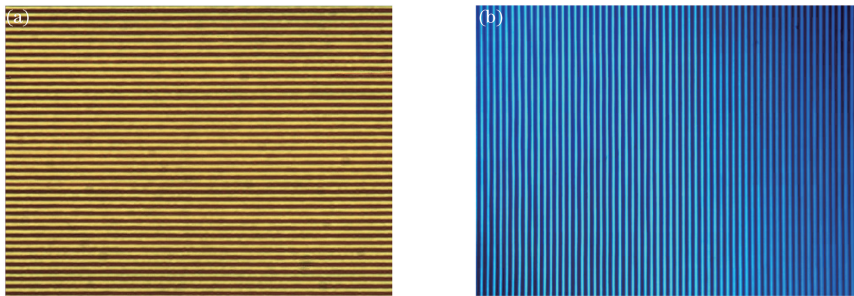


图 12 铬光栅模板条纹显微镜图片。(a) 线宽为 750 nm ,周期为 $1.5 \mu\text{m}$; (b) 线宽为 800 nm ,周期为 $2 \mu\text{m}$
Fig. 12 Microscope images of chrome grating template stripe. (a) Line width of 750 nm and cycle of $1.5 \mu\text{m}$;
(b) line width of 800 nm and cycle of $2 \mu\text{m}$

图 12 (b)为通过分束比为 1×25 、发散角为 0.74 mrad 的达曼光栅分束刻写出的线宽为 800 nm 、周期为 $2 \mu\text{m}$ 的铬光栅模板条纹显微镜图片,该光栅占空比为 0.6 。该光栅的刻写是利用 $50 \times$ 、数值孔径为 0.6 、焦距为 4.0 mm 的显微物镜完成的,此时达曼光栅的旋转角度为 47.5° 。由图 12(a)和(b)可知,光栅线条具有较好的均匀性及直线性。

6 结 论

根据差动像散原理,利用 Matlab 软件仿真确定透镜和光路参数,进行光路设计,搭建调平聚焦伺服控制系统。通过实验,得到良好的实时探测曲线,探测范围为 $3 \mu\text{m}$,静态聚焦误差达到 $\pm 5.0 \text{ nm}$ 。动态刻写时,PZT 的伸长量可保证在焦深范围内,可探测调平台的倾斜和俯仰在 0.01 mrad 左右,实现了焦点位置纳米量级的精度,并能成功实现自动聚焦功能。相比于原来的系统,该调平自动聚焦系统灵敏度更好,聚焦精度更高,满足激光直写要求。将该系统用于并行激光直写中,已刻写出具有线宽为 750 nm 、占空比为 0.5 的均匀线条的光栅,为进一步刻写出更大尺寸、更高密度的光栅提供了条件。

参 考 文 献

- [1] Ren Yantong, Fu Yongqi. The diffraction optical element technology and the future outlook[J]. Optics and Precision Engineering, 1997, 5(2): 7-11.
任延同,付永启. 衍射光学元件制作技术及未来展望[J]. 光学精密工程, 1997, 5(2): 7-11.
- [2] 麻健勇,曹武钢,周常河. 多光束激光并行直写光栅的装置及其光栅直写方法: 中国, CN 102253605 A[P/OL]. 2011-11-23.

- [3] Jin Zhanlei, Tan Jiubi, Zhang Shan. Research of linewidth stabilizing method during defocusing laser direct writing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1730-1734.
金占雷, 谭九彬, 张 山. 离焦激光直写的线宽稳定方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1730-1734.
- [4] Gale M T, Rossi M. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3556-3566.
- [5] Korolkov V P, Malyshev A I. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs[C]. *SPIE*, 1999, 3633: 129-138.
- [6] Huang P S, Kiyono S, Kamada O. Angle measurement based on the internal reflection effect: a new method[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(28): 6047-6055.
- [7] Xia Yiqun. Study on differential astigmatism focus detection system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001: 41-48.
夏轶群. 差动像散法光焦点检测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001: 41-48.
- [8] Huang P S, Ni J. Angle measurement based on the internal reflection effect using elongated critical-angle prisms[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(13): 2239-2241.
- [9] Udupa G, Singaperumal M, Sirohi R S, *et al.* Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. principles and the measurement system[J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11(3): 305-314.
- [10] He Fengtao, Bai Yonglin, Feng Xiaoqiang, *et al.* The real-time measurement of astigmatic principle on micro displacement and micro vibration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10): 1208-1209.
贺锋涛, 白永林, 冯晓强, 等. 像散法对微位移和微振动的实时测量[J]. *光子学报*, 2003, 32(10): 1208-1209.
- [11] Qiang X F. Electric instrument for geometric measurement[M]. Beijing: Mechanical Engineering Press, 1981: 38-41.
- [12] Tsuguo K. High precision optical surface sensor[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(1): 103-108.
- [13] Kohno T, Ozawa N, Miyamoto K, *et al.* Practical non-contact surface measuring instrument with one nanometre resolution[J]. *Precision Engineering*, 1985, 7(4): 231-232.
- [14] Pan Ping. Study on differential astigmatism detection technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 8-10.
潘 萍. 差动像散离焦检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 8-10.
- [15] Wang Dongfang. An monitoring experimental facility based on one-way defocus differential astigmatic principle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 14-17.
王东芳. 基于单向离焦的差动像散监测实验装置[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 14-17.
- [16] Moharam M, Gaylord T K. Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(10): 187-192.
- [17] Zheng J, Zhou Chang he. Beam splitting of low-contrast binary gratings under second Bragg angle incidence[J]. *JOSA A*, 2008, 25(5): 1075-1083.
- [18] Liao Feihong, Li Xiaoping, Chen Xuedong, *et al.* Probe spot position error on the accuracy of focusing and leveling measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1041-1045.
廖飞红, 李小平, 陈学东, 等. 调焦调平探测光斑位置误差对测量准确度影响的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1041-1045.
- [19] Sun Yuwen, Li Shiguang, Ye Tianchun, *et al.* Process dependency of focusing and leveling measurement system in nanoscale lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 812001.
孙裕文, 李世光, 叶甜春, 等. 纳米光刻中调焦调平测量系统的工艺相关性[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 812001.
- [20] 朱 锋, 周常河, 麻健勇. 多光束并行激光直写装置及其直写方法: 中国, CN 102621823 A[P/OL]. 2012-8-1.
- [21] Brown A J C. Rapid optical measurement of surfaces[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1995, 35(2): 135-139.
- [22] Zhu Feng. Parallel direct-laser-writing lithography based on Dammann grating[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014: 24-41.
朱 锋. 基于达曼光栅的并行激光直写光刻机研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2014: 24-41.