

文章编号 1004-924X(2025)13-2056-10

全息曝光干涉条纹相位锁定系统设计

王起程^{1,2}, 王新宇¹, 于宏柱¹, 姜岩秀¹, 李文昊^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了制作高质量的全息光栅, 提高分振幅曝光系统的条纹稳定性, 分析了不同分束器件对条纹稳定性的作用, 设计实现了全息光栅干涉条纹的相位锁定系统。基于干涉曝光的原理以及条纹漂移对曝光对比度的影响, 分析了使用不同分光器件时对光源指向性的要求, 提出了基于基准光栅 Moiré 条纹的干涉条纹变化检测方法。选取合适的探测器件与执行器件, 基于 STM32 单片机结合 PID 算法设计了条纹相位闭环锁定系统。实验结果表明: 该锁定系统能实现 1 kHz 的控制频率, 对主要存在于 0~3 Hz 的低频漂移有良好的抑制效果, 锁定后条纹漂移的 RMS 值为 0.0047λ。光源指向稳定性较差时, 在曝光系统中使用光栅分光结合单点相位锁定的方式能满足大尺寸光栅制造的干涉条纹稳定性要求。

关键词: 全息光栅; 相位锁定; Moiré 条纹; 闭环控制

中图分类号: TP273; TH691.9 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253313.2056

CSTR: 32169.14.OPE.20253313.2056

Design of holographic exposure interference fringe phase locking system

WANG Qicheng^{1,2}, WANG Xinyu¹, YU Hongzhu¹, JIANG Yanxiu¹, LI Wenhao^{1*}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: liwh@ciomp.ac.cn

Abstract: To fabricate high-quality holographic gratings and improve the fringe stability of the beam-splitting amplitude exposure system, this study analyzes the effects of different beam-splitting devices on fringe stability and designs a phase-locking system for holographic grating interference fringes. First, based on the principles of interference exposure and the impact of fringe drift on exposure contrast, we analyzed the directional requirements for light sources when using different beam-splitting components. A detection method for interference fringe variations, utilizing Moiré fringes from a reference grating, was investigated. Suitable detectors and actuators were selected, and a closed-loop fringe phase-locking system was designed and implemented using an STM32 microcontroller integrated with a PID algorithm. Experimental results demonstrate that the locking system achieves a control frequency of 1 kHz, effectively suppressing

收稿日期: 2025-03-13; 修订日期: 2025-04-02.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFB3606100); 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划资助项目 (No. YSBR-103); 吉林省科技发展计划科技条件与平台建设计划资助项目 (No. 20220505001ZP)

low-frequency drift primarily within 0~3 Hz. After stabilization, the root mean square (RMS) value of fringe drift was reduced to 0.0047λ . When laser pointing stability is insufficient, the proposed grating-based beam splitting combined with single-point phase locking can meet the fringe stability requirements for large-scale holographic grating fabrication.

Key words: holographic grating; phase locking; Moiré fringe; closed loop control

1 引言

全息光栅在调频脉冲压缩^[1-2]、精密位移测量^[3-4]和光谱仪^[5-6]等领域有着广泛的应用。制作全息光栅时,光学平台振动、气流扰动、温度变化等因素^[7],导致干涉条纹发生漂移,曝光对比度降低,使全息光栅的槽型变差,进而影响到成品光栅的衍射效率和杂散光水平^[8-9]。为此,通常采用封闭光路,隔振平台等方式被动降低干涉条纹的漂移量。但是这些被动方法不能完全消除干涉条纹的漂移,需引入基于反馈控制的主动相位锁定系统^[10]。常用的锁定方案有声光调制器(AOM)和压电陶瓷^[13-16]两种类型。其中,压电陶瓷因其结构简单等优势,在静态曝光系统中有着广泛应用。

相位锁定通常要求条纹漂移的RMS值小于 0.05λ ^[7]。2008年,钱国林等使用CCD探测实现了对干涉条纹的锁定,条纹漂移的RMS值为 0.029λ ^[7]。但是,使用CCD探测的方式通常受限于CCD相机的帧率,控制的实时性较差。同时,CCD的探测精度也受限于像素的数量^[14]。相较而言,PD探测器直接将条纹的光强信号转化为电压信号,信号带宽通常有几千赫兹到几兆赫兹。2017年,宋莹等使用压电陶瓷结合PD探测器实现了 $3\sigma=0.021\lambda$ 的锁定结果^[15]。

制作大尺寸全息光栅通常需要较长的曝光时间,曝光过程中条纹周期在缓慢地变化。2018年,上海光机所的张栋等对曝光条纹的周期进行锁定^[14]。2019年,苏州大学的钱国林等设计实现了对曝光条纹的相位、周期和角度进行三维锁定系统^[16]。若相位锁定系统只对单点进行锁定,当存在曝光条纹周期变化时,偏离锁定点的区域相位稳定性下降^[8]。2015年,姜岩秀等使用光栅分束代替棱镜分束以降低光束指

向性对曝光条纹周期的影响^[17]。其结果表明,使用光栅分光对于光源指向角度稳定性的要求大大降低,但是其分析过程仅仅考虑曝光条纹的周期变化,忽略了光源角度变化导致的干涉条纹漂移。

本文从曝光系统的原理出发,根据曝光条纹的周期变化,分析了使用不同分光器件时入射光角度对曝光条纹边缘的相位的影响。进一步通过光线追迹分析使用不同分光器件时,入射光角度变化引起的曝光条纹平动,通过几何关系推导了相位漂移表达式,说明了对光源指向性的要求。同时,分析了基于Moiré条纹法的条纹漂移检测原理,选定光电探测器与压电陶瓷型号,使用STM32F407VET6单片机基于PID算法设计实现了相位锁定系统。控制逻辑在单片机的定时器中断中执行,确保系统控制的实时性与准确性。

2 工作原理

2.1 分振幅全息曝光原理

图1为分振幅全息曝光系统原理图。从激光器出射的高斯光束经过分束元件分光后形成两束光。经过由聚焦透镜和小孔组成的空间滤波器滤除光束中的高频分量后形成点光源,点光源发出的球面波由准直镜准直形成平面波入射到覆有光刻胶的基底上,两平面波相互干涉形成曝光干涉条纹。基底上的光刻胶上在曝光条纹的作用下形成潜像光栅,经过后续的显影等步骤即可获得全息光栅。光路中基准光栅的作用是对干涉条纹进行等效放大并结合光电探测器对条纹的相位进行探测^[18-20]。在一路光束的反射镜上安装压电陶瓷可以对两曝光光束的光程差进行调整,以实现干涉条纹的稳定。

由物理光学的基本原理可知,理想情况下两

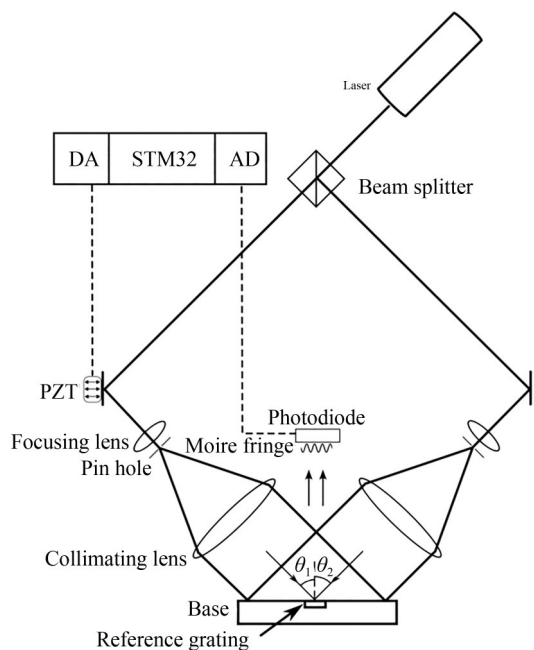


图 1 分振幅全息曝光系统原理

Fig. 1 Schematic of beam-splitting amplitude holographic exposure system

束平面波形成的干涉条纹表达式为:

$$I = I_0 + I_A \cos(k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)x + \phi(x, y)), \quad (1)$$

其中: I_0 是平均光强, I_A 是光强变化量的振幅, θ_1 和 θ_2 分别是左右光束的入射角, $\phi(x, y)$ 是两光束在光刻胶上 (x, y) 处的相位差。

基底上的干涉条纹周期为:

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}. \quad (2)$$

2.2 光束指向性要求及分光器件选择

曝光系统通常要求曝光对比度在 95% 以上, 则条纹漂移的 RMS 值应小于 0.05λ ^[8]。当入射曝光系统的光束指向稳定性较差时, 曝光条纹的周期会发生变化^[17, 21], 随着光栅尺寸的增加, 边缘区域的条纹随着周期变化也会产生相应的漂移。根据式(2), 当光栅长度为 L 时, 光栅刻线数为:

$$N = \frac{L}{d} = \frac{L(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\lambda}. \quad (3)$$

假设左右光束的角度相等, 即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 。使用棱镜分束与光栅分束时, 光源指向角度变化与入射基底的平面波角度关系如图 2 所示。其中, δ 是光源角度的变化, $\gamma = f_1/f_2$ 是准直扩束系统的角度系数, f_1 是聚焦透镜的焦距, f_2 是准直透

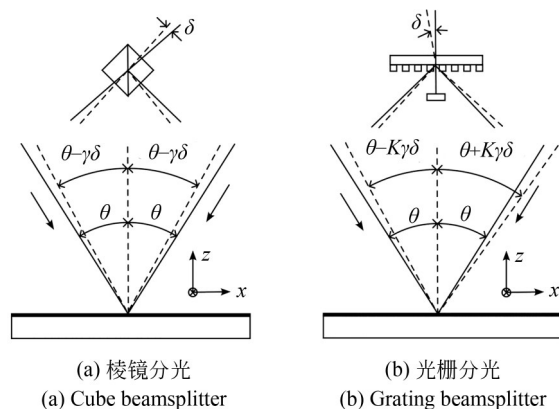


图 2 使用不同分光器件时光束夹角的变化情况示意图
Fig. 2 Schematic diagram of inter-beam angle variations with different beam-splitting devices

镜的焦距, $K = 1/\cos \beta$ 是分束光栅衍射的角度系数, β 是分束光栅的衍射角。

使用棱镜分光, 当光源角度变化时, 光束角度发生对称变化, 刻线数的变化与入射光角度变化的关系如下:

$$\Delta N = \frac{2L\gamma\delta \cos \theta}{\lambda}. \quad (4)$$

使用光栅分光, 当光源角度变化时, 光束角度发生反对称变化, 刻线数的变化与入射光角度变化的关系如下:

$$\Delta N = \frac{-L \sin \theta (K\gamma\delta)^2}{\lambda}. \quad (5)$$

使用 390 nm 光源制作 270 nm 周期光栅, 取 $\gamma = 0.002$ 。当条纹数变化量 $|\Delta N| < 0.05$ 时, 要求的光束角度随着光栅尺寸的变化关系如图 3 所示。从图中可以看出, 以棱镜分光时, 随着

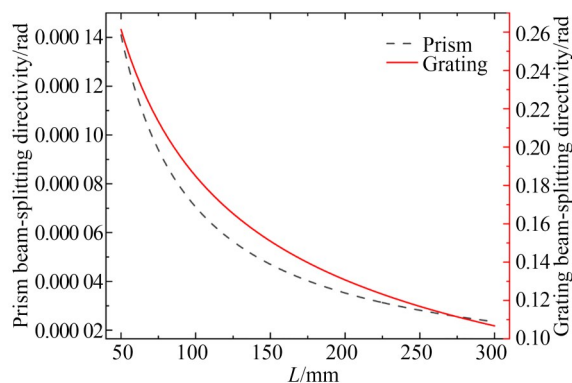


图 3 指向性要求与光栅尺寸的关系

Fig. 3 Relationship between directional requirements and grating size

光栅尺寸的增大,对光源指向性的要求逐渐严格,当光栅宽度为 300 mm 时,需要的指向稳定性为 $19.6 \mu\text{rad}$ 。当使用周期为 555 nm 的分束光栅,衍射级次为 ± 1 时,光束指向性要求为百毫弧度量级。因此仅仅考虑潜像光栅的周期时,使用光栅分光对入射光角度变化的要求相当宽松。

但是上述分析忽略了随着入射光角度的变化所导致的曝光条纹漂移。进一步使用 Python 进行数值计算光线追迹的方式,分析使用不同分光器件时干涉条纹的相位漂移。为了便于分析,忽略光路中的准直放大系统。实际分析的光路图如图 4 所示。基准光栅位于左右两光束交点位置下方 s 处,用于模拟系统装调过程中的误差。基准光栅的周期为 539.9 nm。

数值分析结果如图 5 所示。图 5(a)是当基准光栅的位置与交点位置重合,即 $s=0$ 时,棱镜分光与光栅分光的条纹变化情况。可以看出,当光束角度变化时,棱镜分光存在周期变化,光栅

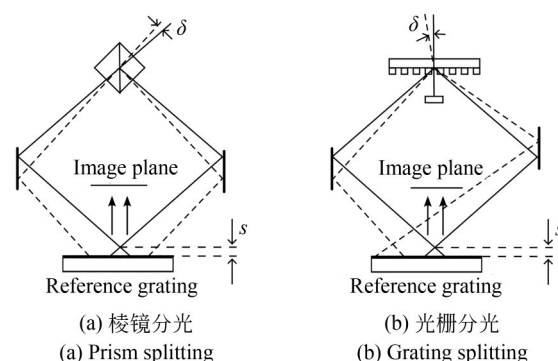


图 4 光线追迹数值分析的实际光路

Fig. 4 Actual optical path for ray-tracing numerical analysis

分光周期稳定。图 5(b)是当 $s=0.5 \text{ mm}$ 时干涉场的变化情况。棱镜分光时仍存在条纹周期的变化,光栅分光时条纹周期稳定,但是存在条纹平移。图 5(c)是 $s=0$,入射光束的初始角度偏离理想情况 0.57° 时的干涉场变化情况。棱镜分光时,干涉条纹周期变化的中心发生漂移;光栅分光时,周期保持稳定,条纹产生漂移。

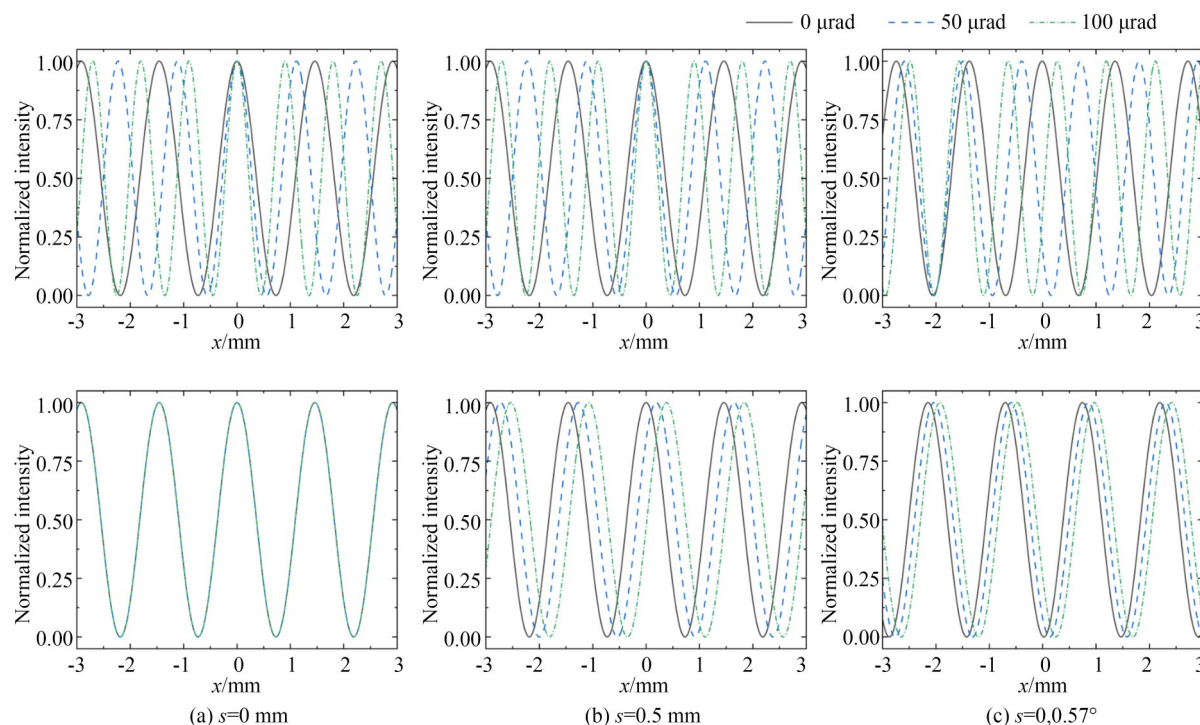


图 5 使用不同分光器件时光线追迹得到的干涉条纹变化情况

Fig. 5 Interference fringe variations derived from ray-tracing with different beam-splitting devices

对由于光源入射角度变化引起的条纹漂移进行理论分析,将光栅分光时的光路展开如图 6

所示。假设分光位置到 A 的直线距离为 L_0 。起初两束光均呈 θ_0 角入射到探测点 A, A 点的相位

差为 0。随着光源角度的变化,两束光的角度分别变为 $\theta_0 + \delta$ 与 $\theta_0 - \delta$ 。计算可得由于光束角度变化所导致的相位变化量为:

$$\Delta\phi = L_0 \cos(\theta_0 - \delta) - L_0 \cos(\theta_0 + \delta) = 2L_0 \sin \theta_0 \sin \delta \approx 2L_0 \delta \sin \theta_0. \quad (6)$$

由此可知,光栅分光时由于光束指向性问题引起的条纹漂移量正比于光束偏移的角度。通过数值仿真计算得出曝光条纹的相位漂移量随着光源指向性的变化情况,如图 7 所示。仿真结果表明,相位的漂移量与角度的偏移量成正比,与理论上的偏差相符合。同时,若相位的变化量小于 0.05λ ,则光束的指向角度变化应小于 $19.2 \mu\text{rad}$ 。

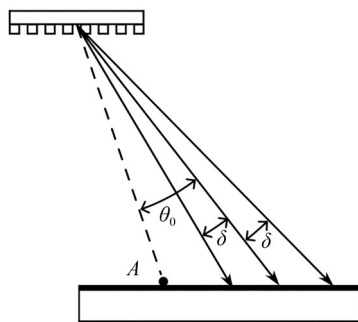


图 6 使用光栅分光时的光路展开示意图

Fig. 6 Light path expansion with grating splitting

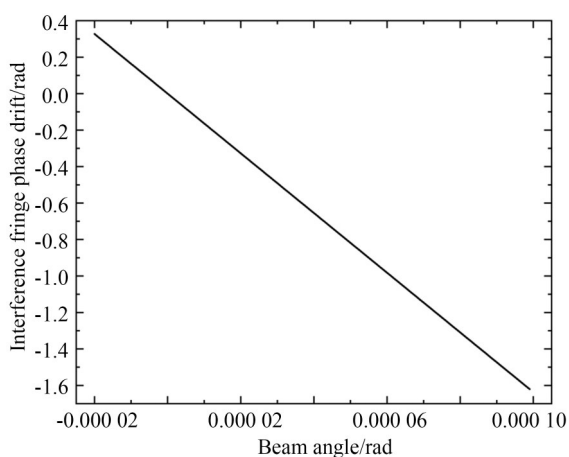


图 7 使用光栅分光时探测点的相位随入射光角度变化

Fig. 7 Variation of phase of detection point with angle of incident light for grating splitting

使用不同的分光器件对相位进行锁定时,光源的指向性同样要在数十微弧度以内,但是

限制光束角度变化的原因是不同的。使用棱镜分光时,角度变化导致潜像光栅的周期发生变化,影响到曝光边缘区域的相位稳定性,仅仅依靠单点的相位锁定难以保证干涉场的曝光质量,需要对潜像光栅的周期进行锁定。使用分束光栅进行分光时,激光源的光束角度变化基本不会引起潜像光栅的周期变化,仅仅是产生与系统的装调误差成正比的潜像光栅的相位平动。使用相位锁定系统对潜像光栅条纹进行锁定可以有效解决控制系统的装调误差。因此,在制作大面积光栅时,使用分束光栅分光具有一定的优势。

2.3 基于 Moiré 条纹的相位探测方式

曝光条纹的周期通常是亚微米量级,远远小于探测器单元的尺寸,难以直接探测。常用间接的方式去探测,即通过一定手段将干涉条纹进行等价放大。本文选用基准光栅的方式,即在曝光区域放置一块刻线周期为曝光条纹周期整数倍的基准光栅。相较于使用棱镜搭建零差干涉光路的方式^[19],其光路简单并且可以为精确调整曝光条纹周期提供基准^[18]。

设基准光栅的周期为 d_{ref} ,曝光条纹的周期为 d ,左右光束分别以 θ_1 与 θ_2 入射到基准光栅与基底上。左光束经过基准光栅的衍射后,第 $-(n-m)$ 衍射级的衍射角为:

$$\theta_{-(n-m)} = \arcsin\left(\sin \theta_1 - (n-m) \frac{\lambda}{d_{\text{ref}}}\right). \quad (7)$$

右光束经过基准光栅的衍射后,第 m 衍射级的衍射角为:

$$\theta_m = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d_{\text{ref}}} - \sin \theta_2\right). \quad (8)$$

当两衍射光基本重合时,即 $\theta_m = \theta_{-(n-m)}$ 时,有:

$$d_{\text{ref}} = nd. \quad (9)$$

因此,当选用的基准光栅周期为曝光条纹周期的整数倍时,左右两曝光光束完全重合。然而,此时 Moiré 条纹的周期是无限大的,无法作为基准使用。为了产生有限周期的 Moiré 条纹,基准光栅周期与曝光条纹周期的整数倍应存在一微小的差值。即选用的基准光栅周期满足:

$$d_{\text{ref}} = (n + \Delta n)d. \quad (10)$$

结合式(2),式(7),式(8)与式(10),可知

Moiré 条纹的周期为:

$$d_{\text{moire}} = d \frac{n + \Delta n}{|\Delta n|}. \quad (11)$$

由于基准光栅对曝光的两束光只起衍射作用,所以当左右两束光的相位差发生变化时,Moiré 条纹与曝光条纹发生相同的相位漂移。又由于 Moiré 条纹与曝光条纹的周期不同,相同的相位漂移对应的条纹位置的漂移量与条纹的周期成正比。因此,可以通过较大周期的 Moiré 条纹的漂移量探测曝光条纹的漂移量。

3 相位锁定系统设计

3.1 锁定系统设计

相位锁定系统结构如图 8 所示。相位锁定系统由探测器、控制器和执行器 3 部分组成,形成闭环控制,实时修正相位的偏移量实现相位锁定。探测器负责探测当前曝光条纹的相位漂移,以模拟电压的形式传递给控制器,控制器运算后生成控制电压驱动执行器,执行器通过推动镜子改变其中一束光的光程以补偿相位量。

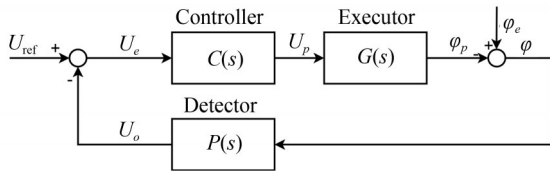


图 8 相位锁定系统框图

Fig. 8 Block diagram of phase locking system

将 PD 探头置于 Moiré 条纹区域,当干涉条纹发生漂移时,PD 探头接收的光能量发生变化。PD 探头输出的模拟电压对应 Moiré 条纹的相位变化。其关系为:

$$U(t) = U_0 + U_A \cos(\varphi(t)), \quad (12)$$

其中: U_0 是输出电压信号的直流分量, U_A 是输出电压信号的交流振幅, $\varphi(t)$ 是 Moiré 条纹的相位。

由于光刻胶在紫外波段具有较高的响应,曝光使用的激光器通常是紫外波段的。选用定制的紫外增强型探头,在光刻胶响应较高的紫外波段仍有 0.1 A/W 以上的响应度,该探头内

部具有多档放大能力,对光电二极管输出的光电流进行 $1.51 \times 10^3 \sim 4.75 \times 10^6$ V/A 的增益。以最大增益进行放大时仍然可以达到 3 kHz 的带宽,实测电压输出为 0~10 V,输出噪声 RMS 小于 1 mV。

控制器基于 STM32F407VET6 单片机开发实现。考虑到 STM32 单片机自带的模数和数模转换的输入与输出能力,使用外接模块的方式进行扩展。模数转换模块选用 AD7606 模块。该模块的量程为 -10~10 V,分辨率为 16 bit,最大采样率为 200 kHz。在不同的激光器输出功率下,PD 探头可以选择不同的增益档位,使输出的电压峰峰值至少为 3.3 V。因此,系统的相位分辨能力为 0.000 290 5 rad。控制器的数模转换部分选用 DAC8563 模块。该模块的输出电压为 0~10 V,分辨率为 16 bit,电压输出精度为 152.6 μ V。控制算法通过在 STM32 单片机执行位置式 PID 实现。控制器实物如图 9 所示。

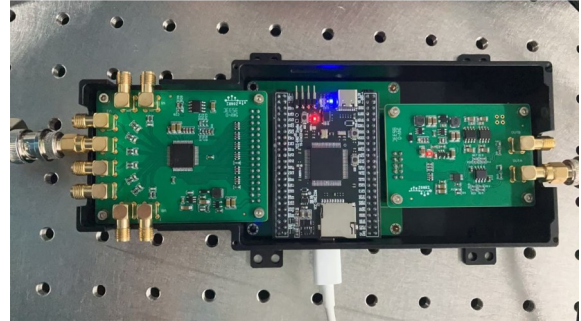


图 9 控制器实物

Fig. 9 Photograph of controller hardware

执行器使用芯明天的 H80K1T35 压电陶瓷及其配套驱动器 E51.C 实现。压电陶瓷的全行程约为 0.7 μ m。当光源波长为 390 nm,光束入射到反射镜的入射角为 33.309°时,压电陶瓷的相位调整范围为 0~6 π ;当输入电压精度为 152.6 μ V 时,相位调整精度为 0.000 287 6 rad,满足实现锁定系统的需求。

3.2 相位锁定程序设计

STM32 单片机的相位锁定程序结构如图 10 所示。启动后,STM32 单片机创建两个消息队列用于主循环与中断函数之间的通信,对外部扩展的模数和数模转换模块进行初始化后,启动定时

器中断,然后通过串口与上位机进行通信,交换控制指令与数据。每 1 ms 执行一次控制逻辑的定时器中断函数,单次控制时间小于 200 μs ,因此控制频率为 1 kHz。控制中断设定较高的优先级,以保证系统控制的实时性。采用数据队列的方式可以保证主循环和定时器中断函数之间的功能解耦,进一步保证了控制程序执行的实时性。

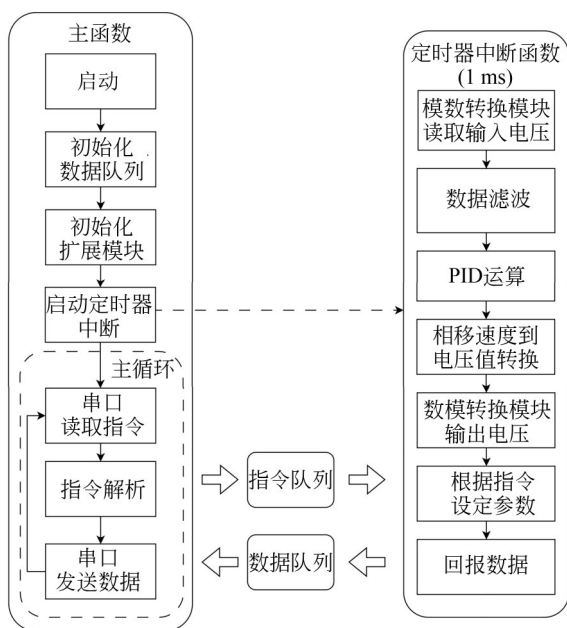


图 10 相位锁定系统程序结构

Fig. 10 Software architecture of phase-locked system

为降低工频信号对系统的干扰,采用 FIR 滤波器对输入的模拟电压进行滤波。FIR 是基于滑动窗口的低通滤波,随着 FIR 阶数的提高,滤波数据的信号会产生很大的相位延迟,影响控制效果,本设计中阶数为 4 阶。4 阶 FIR 滤波器的输出序列 $z[n]$ 与输入序列 $x[n]$ 的关系为:

$$z[n] = a_0 x[n] + a_1 x[n-1] + a_2 x[n-2] + a_3 x[n-3] + a_4 x[n-4]. \quad (13)$$

使用 Python 对系数进行设计以滤除 50 Hz 工频及以上的高频信号,截止频率设置为 45 Hz。相应的系数如下: $a_0 = 0.03418790$, $a_1 = 0.24031013$, $a_2 = 0.45100395$, $a_3 = 0.24031013$, $a_4 = 0.03418790$ 。

由于压电陶瓷存在较大的非线性效应^[22],给定相同的电压,压电陶瓷的实际位置有百纳米量

级的偏差,难以满足控制需求。所以,将 PID 算法计算出来的输出量定义为相位的漂移速度,记作 v_ϕ ,则控制器输出的相位量为:

$$\phi[n] = v_\phi \Delta t + \phi[n-1], \quad (14)$$

其中: $\phi[n]$ 是第 n 次控制输出的相位量, Δt 是两次控制之间的时间间隔。相位量再经过一定比例转化为控制器的实际输出电压,即:

$$U_o[n] = \frac{U_m \lambda}{4\pi S_m \cos \alpha} \phi[n], \quad (15)$$

其中: $U_o[n]$ 是第 n 次控制输出的电压值, U_m 是 DAC 模块输出的最大电压, S_m 是压电陶瓷的最大行程, α 是入射角。

4 实验结果分析

锁定实验选用的光源波长为 390 nm,, 实验室温度 (22 ± 0.1) $^{\circ}\text{C}$, 湿度 20%~40%, 采用的隔震平台隔振等级为 VC-D, 相位锁定的实验结果如图 11 所示。可以看到, 在 0~50 s 内, 系统尚未开始锁定, 条纹存在低频的漂移叠加较高频的振动。条纹漂移量较大, 会对曝光结果产生极大的影响。电压波动为 0.512~4.424 V。在第 50 s 时, 锁定系统启动, 设定目标值为 2.88 V。锁定后低频漂移基本消除, 只存在频率较高的振动信号, 电压漂移 RMS 值为 56.9 mV, 对应条纹漂移的 RMS 值为 0.0047 λ 。当电压漂移的

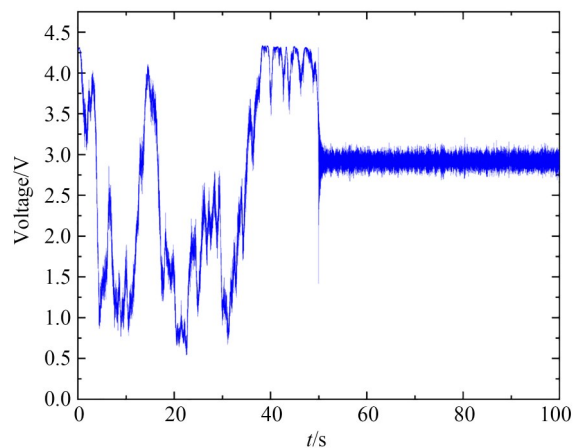


图 11 相位锁定实验结果

Fig. 11 Results of phase locking experiment

RMS 值较小时,条纹漂移量与干涉场电压变化近似呈线性关系^[11]。条纹漂移量与干涉场电压变化的关系为:

$$\Delta N = \frac{dN}{d\phi} \frac{d\phi}{dU} U_{\text{RMS}} = \frac{U_{\text{RMS}}}{-2\pi U_A \sin \phi_L}, \quad (16)$$

其中: $d\phi/dU$ 是由式(12)求导得出, ϕ_L 是锁定电压对应的相位, $U_A = U_{\text{pp}}/2$ 是电压变化的幅度, U_{pp} 是未锁定时电压随相位差变化的峰峰值。因此,条纹漂移量为 0.0047λ 。采用相同的计算方法进行对比,本文所得锁定精度较文献[11]提升约65%,较文献[15]提升约30%。

进一步分析锁定结果,将锁定前后数据去掉直流分量后进行频谱分析,如图12所示。锁定前在 $0\sim 3\text{ Hz}$ 间有大幅度的低频漂移,在 10 Hz 和 $20\sim 30\text{ Hz}$ 有小幅的较高频漂移;锁定后 $0\sim 3\text{ Hz}$ 的低频漂移基本抑制, 10 Hz 处的漂移峰值从 0.00719 V 降低到 0.000833 V , $20\sim 30\text{ Hz}$ 之间小幅振动峰值从 0.00976 V 降低到 0.00327 V 。

为了进一步提高控制能力,对PID参数进行调整。当PID控制器以更快的速度驱动压电陶瓷运动时,压电陶瓷开始出现谐振,这是因为压电陶瓷的机械性质限制了锁定系统的锁定能力。后续要对锁定系统执行器的运动性能进行实验分析,以进一步提高系统的锁定能力。

5 结 论

为了满足使用静态分振幅法制作全息光栅的需求,本文对相位锁定系统的原理进行了分析,通过光线追迹的方式仿真计算了使用不同分光器件时由于光源指向角度变化引起的干涉

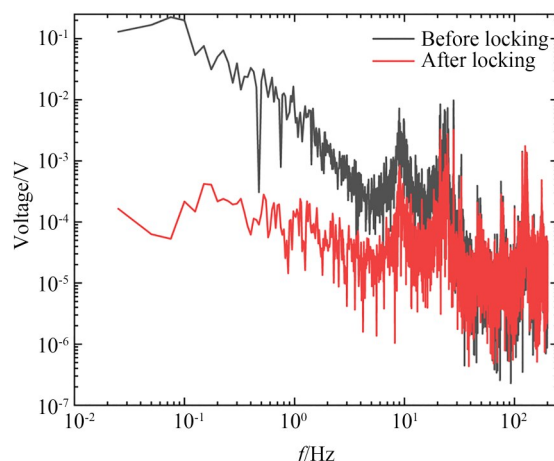


图12 锁定前后的频谱对比

Fig. 12 Spectrum comparison before and after locking

场变化,得出使用分束光栅与分束棱镜时光源指向性的要求。同时分析相位锁定系统的实现方式,根据系统需求选择相应器件,基于STM32F407VET6单片机设计实现了相位锁定系统。该系统的相位探测精度为 0.0002905 rad ,相位调整能力为 0.0002876 rad ,控制频率为 1 kHz ,通过PID算法实现了对干涉条纹低频漂移的锁定,锁定后条纹漂移RMS值为 0.0047λ 。

作者贡献声明:

王起程:方法的提出,论文构思和撰写;

王新宇:测量实验的设计及数据整理和分析;

于宏柱:程序设计,控制软件开发;

姜岩秀:实验指导,实验数据分析;

李文昊:研究方法及写作指导。

参考文献:

- [1] DIOP S, BONOD N, CHOREL M, *et al.* Impact of the multilayer dielectric design on the laser-induced damage threshold of pulse compression gratings for petawatt-class lasers [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(17): 4669-4672.
- [2] ALESSI D A, BUDE J D, NGUYEN H T, *et al.* Pulse compressor architecture to enable next-generation high-energy petawatt-class lasers [J]. *Optics Express*, 2024, 32(23): 41539-41549.
- [3] ZHOU W Y, SUN Y J, LIU Z W, *et al.* A random angle error interference eliminating method for grating interferometry measurement based on symmetry Littrow structure [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(11): 2401659.
- [4] ZHOU W Y, LIU Z W, SUN Y J, *et al.* Bidirectional Littrow double grating interferometry for quadruple optical interpolation [J]. *Optics Laser Tech-*

- nology, 2024, 175: 110751.
- [5] TAN Y L, ZHU J. Direct design method for holographic grating imaging spectrometer and corresponding recording system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 173: 107920.
- [6] ZHANG B Q, TAN Y L, JIN G F, *et al.* Imaging spectrometer with single component of freeform concave grating [J]. *Optics Letters*, 2021, 46 (14): 3412-3415.
- [7] 钱国林, 李朝明, 殷庆琰, 等. 全息曝光条纹锁定系统特性研究[J]. 激光技术, 2008, 32(6): 648-650, 654.
- QIAN G L, LI CH M, YIN Q Y, *et al.* Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (6): 648-650, 654. (in Chinese)
- [8] LEHR D, GLASER T, KOCH F. Stability requirements for two-beam interference lithography diffraction grating manufacturing [C]. *Optifab 2017. October 16-19, 2017. Rochester, USA. SPIE*, 2017: 60.
- [9] XU X, LI W H, Jirigalantu, *et al.* High-speed measurement method for diffraction efficiency of gratings in broad range wavelength based on AOTF [J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 34887-34897.
- [10] 宋莹, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 移频式全息光栅曝光干涉条纹锁定系统的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 318-324.
- SONG Y, BAYANHESHIG, QI X D, *et al.* Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 318-324. (in Chinese)
- [11] 鲁森, 杨开明, 朱煜, 等. 干涉条纹相位锁定系统 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 1213.
- LU S, YANG K M, ZHU Y, *et al.* Interference fringe phase locking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 1213. (in Chinese)
- [12] YU ZHU Y Z, LEIJIE WANG L W, MING ZHANG M Z, *et al.* Novel homodyne frequency-shifting interference pattern locking system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(6): 61201-61206.
- [13] XU Y, LIAO Q K, LIU J. Fringe locking system with large phase compensation range for holographic exposure systems with arbitrary recording wavefronts [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 183: 112254.
- [14] 张栋, 赵成强, 徐文东, 等. 大尺寸全息光栅曝光中条纹平移和周期的锁定[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 162-168.
- ZHANG D, ZHAO CH Q, XU W D, *et al.* Locking of the fringe position and period in large-size holographic grating exposure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 162-168. (in Chinese)
- [15] 宋莹, 赵旭龙, 姜岩秀, 等. 移栅型全息光栅曝光干涉条纹锁定 [J]. 中国激光, 2017, 44(5): 233-240.
- SONG Y, ZHAO X L, JIANG Y X, *et al.* Interference fringe locking by grating-shifting holographic grating exposure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 233-240. (in Chinese)
- [16] 钱国林, 吴建宏, 李朝明, 等. 全息光栅干涉条纹三维锁定系统的设计 [J]. 光学学报, 2019, 39(4): 65-71.
- QIAN G L, WU J H, LI CH M, *et al.* Design of 3D locking system for interference fringes of holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 65-71. (in Chinese)
- [17] 姜岩秀, 韩建, 李文昊, 等. 平面全息光栅曝光系统中的分光器件特性分析 [J]. 中国光学, 2015, 8(2): 241-247.
- JIANG Y X, HAN J, LI W H, *et al.* Characteristic analysis for different beamsplitters of the plane holographic grating lithography system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 241-247. (in Chinese)
- [18] 韩建, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 平面全息光栅刻线密度的倍频式调整方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 39-44.
- HAN J, Bayanheshig, LI W H, *et al.* Method of adjusting the groove density spatial frequency multiplication of plane holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 39-44. (in Chinese)
- [19] ZHAO X L, Bayanheshig, LI W H, *et al.* Moiré alignment algorithm for an aberration-corrected holographic grating exposure system and error analysis [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(31): 8683-8689.
- [20] ZHANG Y N, WANG X Y, SUN Y Q, *et al.* Automatic control method of spherical wave expo-

- sure interference field based on the Moiré alignment principle [J]. *Optics Express*, 2024, 32 (13) : 23767-23783.
- [21] SCHATTENBURG M L, CHEN C G, HEILMANN R K, *et al.* Progress toward a general grating patterning technology using phase-locked scanning beams [C]. *Optical Spectroscopic Techniques, Remote Sensing, and Instrumentation for Atmospheric and Space Research IV*. San Diego, CA. SPIE, 2002: 378-384.
- [22] 吴春婷. 压电陶瓷微定位平台的迟滞补偿控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- WU CH T. *Research of Hysteresis Compensation Control Method for Piezoelectric Ceramic Micro-positioning Platform* [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)

作者简介:



王起程(2000—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,2022年于南京邮电大学获得学士学位,主要从事全息光栅制作工艺研究。E-mail: wangqicheng22@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



李文昊(1980—),男,内蒙古赤峰人,博士,研究员,2002年于陕西科技大学获得学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺,光谱仪器、精密位移测量等方面的研究。E-mail: liwh@ciomp.ac.cn