

doi:10.3788/gzxb20184702.0205001

大尺寸全息光栅曝光中条纹平移和周期的锁定

张栋^{1,2}, 赵成强¹, 徐文东¹, 张益彬¹, 闫昱琪^{1,2}

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所 强激光材料重点实验室, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:采用双光束干涉曝光法制作大尺寸全息光栅时,由于温度变化、空气流动、振动等因素的干扰,曝光条纹相对于光栅基板存在平移和周期变化,从而造成光栅对比度下降。分析了大尺寸光栅曝光过程中条纹的动态变化情况,结果表明:3 h 内条纹平移和周期变化的均方根值分别为 1.87、1.20 个条纹周期,对比度的数值模拟结果分别为 12.83%、67.37%。构建了由三组条纹监视系统、计算控制系统和两组压电位移台组成的曝光条纹锁定系统,实现了条纹平移和周期的同时锁定。锁定之后得到的光栅槽型 and 对比度明显优于未锁定时的情形,锁定精度为:平移 3σ 值为 0.009 个条纹周期,对比度为 99.99%,周期变化均方根值为 0.017 个条纹周期,对比度为 99.77%,满足大尺寸光栅曝光对条纹稳定性的要求。

关键词:全息光栅;干涉条纹;相位锁定;光栅周期;干涉光刻

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0205001-7

Locking of the Fringe Position and Period in Large-size Holographic Grating Exposure

ZHANG Dong^{1,2}, ZHAO Cheng-qiang¹, XU Wen-dong¹, ZHANG Yi-bin¹, YAN Yu-qi^{1,2}

(1 Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(2 University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The position and period of grating fringes will vary against the substrate during double beam interference exposure due to temperature variation, air flow, vibration and other factors in the fabrication of large-size holographic gratings. It will result in the decrease of grating contrast. The dynamic change of fringes was analyzed during large-size grating exposure. The Root-Mean-Square (RMS) errors of fringe translation and period in 3 hours are 1.87 and 1.20 period respectively. The corresponding simulative grating contrasts are 12.83% and 67.37% respectively. A fringe locking system composed of three monitoring subsystems, a computation and control subsystem and two piezo nanopositioners was set up. The translation and period of fringes can be locked at the same time. The groove shape and contrast of gratings are improved significantly after locking. The precision of this fringe locking system: the 3σ value of fringe translation and corresponding contrast are 0.009 period and 99.99% respectively; the RMS error of period change and corresponding contrast are 0.017 period and 99.77% respectively. This locking system satisfies the requirements of fringe stability for the exposure of large-size gratings.

Key words: Holographic grating; Interference fringe; Phase locking; Grating period; Holographic lithography

OCIS Codes: 050.1950; 090.2890; 220.3740

基金项目:国家自然科学基金(No.11604352)资助

第一作者:张栋(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为全息光栅制作.Email:zhangdongsdu@163.com

导师(通讯作者):赵成强(1982—),男,副研究员,博士,主要研究方向为光学设计、机器视觉、光栅制作等.Email:chqzhao@siom.ac.cn

收稿日期:2017-08-14;录用日期:2017-10-31

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

米级全息光栅在高功率激光器的啁啾脉冲放大系统^[1]、大口径天文望远镜的光谱分析^[2]等系统中具有重要应用。全息光栅的制作方法主要有扫描干涉场曝光^[3]、静态干涉场曝光和拼接法^[4]。在静态干涉场曝光过程中,外界环境的干扰,如温度波动、空气流动、器件和平台的震动等,都会使得干涉条纹相位相对于光栅基板产生变化,从而导致光栅对比度的下降。若要保持对比度 95% 以上,需要将条纹错位的均方根值(Root Mean Square, RMS)控制在 0.05λ 以内^[5]。鲁森等^[6]使用声光调制器(Acoustic Optical Modulator, AOM)锁定条纹平移的精度在 3σ 内为 0.04λ ,宋莹等^[7]使用 AOM 锁定的精度在 3σ 内为 0.02λ ,李朝明等使用压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic, PZT)锁定的 RMS 值为 0.017λ ^[8]。

对于中小型的全息光栅曝光系统,由于曝光时间较短(几分钟之内)且条纹数较少,一般只考虑条纹整体平移的影响。而对于大尺寸全息光栅曝光系统,由于激光器功率的限制,其曝光时间可达到 1 h 以上;由于曝光光路过长、元器件较大,光学元器件本身以及配套的机械构件等对于外界温度、振动的干扰更加敏感,因而需要引入条纹锁定系统,同时锁定条纹的平移和周期变化^[9]。

本文在对全息光栅曝光系统干涉条纹变化进行综合研究的基础上,采用三组条纹监视和双路条纹锁定部件,实现了干涉条纹平移和周期的同时锁定,可满足大尺寸光栅曝光对条纹稳定性的需求。

1 锁定系统结构

条纹锁定系统由三组条纹监视系统、基于 LabVIEW 的控制程序和两组 PZT 构成的补偿系统组成。其中监视系统由参考光栅、毛玻璃、中继镜、CCD 等构成。控制程序从图像中提取条纹信息计算变化量^[10]。两组 PZT 分别完成平移补偿和周期变化补偿。

条纹监视系统的光路如图 1(a)所示,由于曝光干涉条纹周期(1 740 线/mm)极小,采用直接的条纹成像方式无法实现条纹监视。通过在光栅基板面位置引入参考光栅^[11-12](870 线/mm),使入射到参考光栅上的两曝光光束的-1 级衍射光接近平行。微调参考光栅的姿态,可以在毛玻璃上形成合适间距的干涉条纹(参考光栅 B、C 之后对应的毛玻璃、中继镜、CCD 等结构未在图中画出)。该条纹被中继镜(放大比例为 1:1)成像到 CCD(分辨率 $1\ 600 \times 1\ 200$, 像素尺寸 $4.4\ \mu\text{m} \times 4.4\ \mu\text{m}$)上并记录下来,称为“参考光栅干涉条纹”,如图 1(b)所示。曝光光束的相位变化与参考光栅干涉条纹相位变化相同^[13],因此可用于监测条纹状态变化。

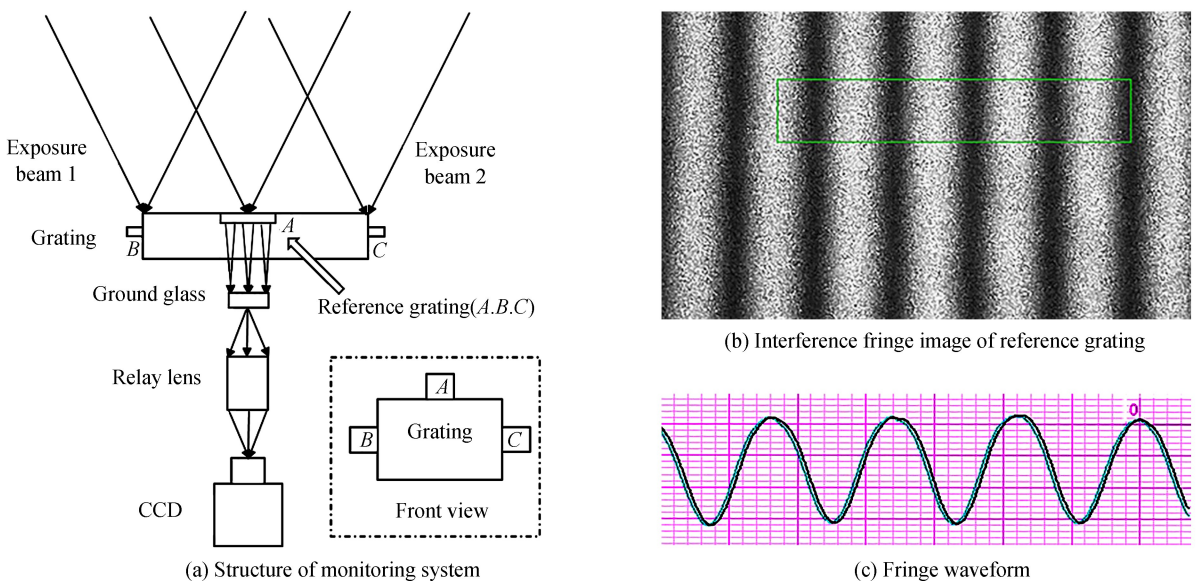


图 1 条纹监视系统

Fig.1 Fringemonitoring system

根据文献[7]中条纹平移变化的频谱分析,造成条纹平移的主要影响因素为 10 Hz 以下的低频振动。综合考虑性能和精度,监视系统图像采样频率设定为 20 Hz。选定图像内一定区域(一般包含几个条纹周期)作

为监视区域,采用构成图像像素的灰度值作为该位置的光强.对区域内纵向取均值并滤波后得到条纹波形,如图1(c)所示,通过互相关计算波形的平移得到条纹平移量.

由外界干扰引起的条纹周期变化十分微小,直接检测单周期的变化量无法实现.在A处锁定平移的条件下,从A处到光栅边缘(B、C处),周期变化量会随着周期数的增加而放大,在B、C处产生明显的周期变化,该周期变化表现为边缘条纹的移动.规定B、C两处周期变化量的正负(即条纹平移的正负),取二者的差值可以排除条纹整体平移的影响.此时得到是光栅整体周期变化量,除以周期数便可得到单周期的变化量.实际应用中采用两组监视系统B和C即可同时完成平移和周期的检测,此处采用三组是为了满足不同的实验条件,获得更多的数据,进行实验验证所需.

曝光光路如图2所示,光源为413.1 nm 氮离子激光器(频移 $<30\text{MHz}/^\circ\text{C}$),调整偏振态和功率比后分为两束,通过 $10\ \mu\text{m}$ 小孔和焦距为2 m的透镜产生曝光所需的平面波^[14].PZT₁带动反光镜移动可以调整两曝光光束的光程差,实现条纹平移补偿.

PZT₂带动聚焦物镜和小孔水平移动,可改变出射平行光的角度从而调整条纹周期.PZT₁为PI公司的E709,控制器为P-752.1CD,移动范围 $15\ \mu\text{m}$,闭环运动精度为0.1 nm.PZT₂为PI的E727,控制器为P-733.3DD,移动范围为 $30\ \mu\text{m}$,闭环运动精度为0.1 nm.控制器采用电压控制模式,通过16位NI-PCI6733数据采集卡输入模拟电压信号,采集卡输出噪声为 $80\ \mu\text{V}_{\text{rms}}$ (直流到1 MHz).

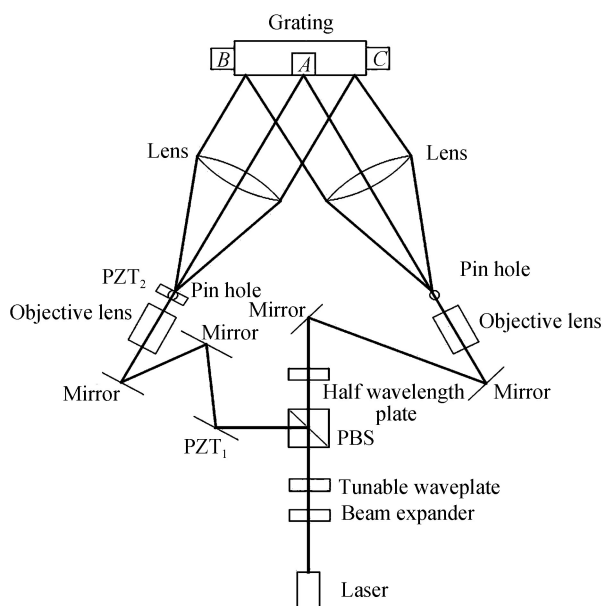


图2 曝光光路图

Fig.2 Exposure light path diagram

2 补偿量及对比度计算

2.1 平移锁定补偿量计算

平移补偿量通过互相关计算^[15],其基本原理为:假设函数 $f_2(x)$ 是经 $f_1(x)$ 平移 Δx 得到的,即

$$f_2(x) = f_1(x - \Delta x) \quad (1)$$

根据傅里叶变换的性质,有

$$F_2(\nu) = F_1(\nu) e^{-j\nu\Delta x} \quad (2)$$

式中, $F_1(\nu)$ 、 $F_2(\nu)$ 分别为 f_1 、 f_2 的傅里叶变换.根据互相关函数与卷积运算的关系有

$$R(x) = f_1(x) \otimes f_2(x) = f_1^*(-x) * f_2(x) \quad (3)$$

式中, \otimes 表示互相关运算, f_1 右上角的 $*$ 表示共轭, f_2 之前的 $*$ 表示卷积运算.计算式(3)的傅里叶变换可得

$$R(\nu) = F_1(\nu) F_1^* e^{2\pi j\nu\Delta x} = F(\nu) e^{2\pi j\nu\Delta x} \quad (4)$$

式中, $R(\nu)$ 是 $R(x)$ 的傅里叶变换, $F(\nu) = F_1 F_1^*$,对式(4)进行傅里叶反变换,可得

$$R(x) = F(x) * \delta(x - \Delta x) = F(x - \Delta x) \quad (5)$$

由自相关函数性质可知,函数 $F(x)$ 的峰值在原点处, $R(x)$ 的峰值在 Δx 处,也就是 f_2 相对于 f_1 的偏移量.因此可以通过计算互相关函数峰值的坐标位置得到函数的平移量.

控制程序在开始锁定时记录条纹初始波形数据,之后计算实时条纹波形与初始波形的互相关,取互相关峰值相对于坐标原点的距离作为波形平移量,此时得到得平移量量纲为像素数.假设1个条纹周期对应于 N 个像素,当两曝光光束产生1个波长 λ 的相位差时,波形会产生 N 个像素的移动.实际锁定时,若通过互相关运算检测到波形存在 Δn 个像素的移动,则像素数与实际距离的转换,也就是PZT₁实际需要运动的补偿值为

$$\Delta x = \Delta n \lambda / N \quad (6)$$

由于像素数是离散值,小于一个像素对应的相位变化无法检测,考虑 N 为120个像素、 $\Delta n=1$ 时,能够检测

的最小平移量为 0.0083λ 。

2.2 周期锁定补偿量计算

通过推导 PZT₂ 的位移 ΔY 与条纹周期 d 的关系, 锁定周期时检测周期变化量便可得到对应的 PZT₂ 需要补偿的移动量。曝光光栅的周期计算公式为

$$d_0 = \lambda / 2 \sin(\omega / 2) \quad (7)$$

式中, ω 为两曝光光束的夹角。当 PZT₂ 带动点光源横向移动 Δy 的距离时, 由此导致光束入射角的变化为

$$\theta = \arctan(\Delta y / f) \quad (8)$$

式(8)中 f 为曝光大透镜焦距, 此时曝光光栅的实际周期 d 为

$$d = \lambda / 2 \sin\left(\frac{\omega + \theta}{2}\right) \quad (9)$$

若检测周期变化的两相机间距离为 L , 由此可计算出当 PZT₂ 移动 Δy 的距离时, 边缘条纹的平移量 ΔY 为

$$\Delta Y = \frac{(d - d_0)L}{d_0} = L \cdot \sin \theta / \sin\left(\frac{1}{2} \arctan \frac{\Delta y}{f} + \theta\right) - L \quad (10)$$

2.3 条纹对比度

验证条纹平移和周期变化对光栅对比度的影响时, 为了排除显影、离子束刻蚀等工艺的影响, 通过控制程序记录条纹变化情况的数据, 数值模拟对比度变化。以振幅为 1, 偏移量为 0.5 的正弦波(对比度为 1)作为基准, 分别按照条纹的相位和周期变化数据叠加波形, 模拟最终得到的光栅条纹, 计算对比度, 得到条纹平移和周期变化对对比度的影响。

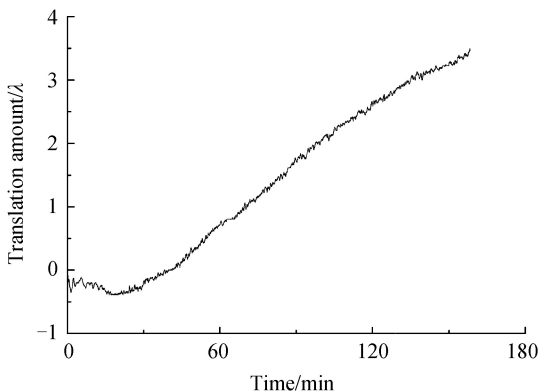
3 实验与分析

首先检验条纹未锁定时的平移和周期变化情况, 然后在相同条件下检验条纹锁定后的变化情况, 通过两者对比检验锁定效果。由于同时锁定条纹平移和周期时, 两者间可能存在干扰, 因此设计了相应实验以检测两者间的干扰是否会对锁定精度产生影响。

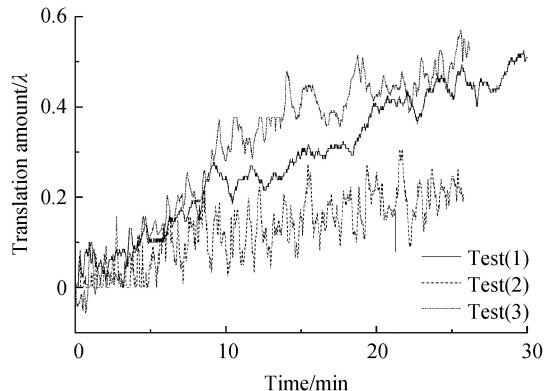
3.1 未锁定时条纹的平移变化情况

当温度等因素对两束光的影响不对称时会引入双光路的光程差, 导致条纹平移的出现。检测未采用锁定系统时条纹的平移变化情况, 实验条件为: 图像采集速率 20 帧/, 曝光室温度 $22 \pm 0.2^\circ\text{C}$, 光栅尺寸 $200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 使用监视系统 A 检测条纹平移(B、C 不工作)。由于条纹单周期变化量十分微小, 且 A 处检测范围仅为几个周期, 可以认为检测区域内条纹周期为常量。图 3(a) 为 3 h 内的变化情况, (b) 为 3 次 30 min 内的变化情况, 各次实验间均有 1 天以上的间隔。

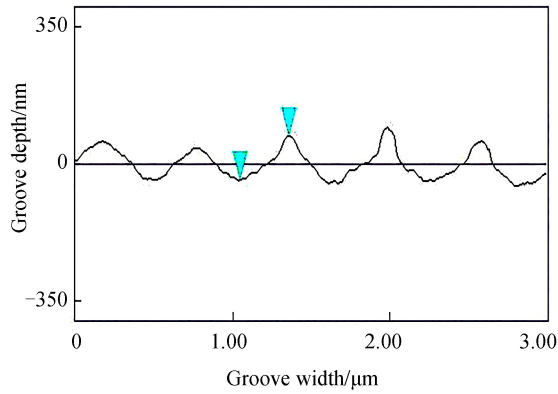
从图 3(a) 中可以看出, 未锁定时条纹发生明显的非线性平移, RMS 值为 1.87λ , 光栅对比度的数值模拟结果为 12.83%。图 3(c) 为原子力显微镜(Arithmetic Force Microscope, AFM)下观察到的光栅槽型, 光栅槽型已不明显, 严重影响光栅质量。3 次 30 min 条纹变化的 RMS 值分别为 0.31λ 、 0.21λ 、 0.34λ , 光栅对比度的数值模拟分别为 65.13%、78.54%、56.35%。从实验数据看平移对光栅质量影响很大, 必须进行锁定。



(a) Prolonged exposure time



(b) Short exposure time



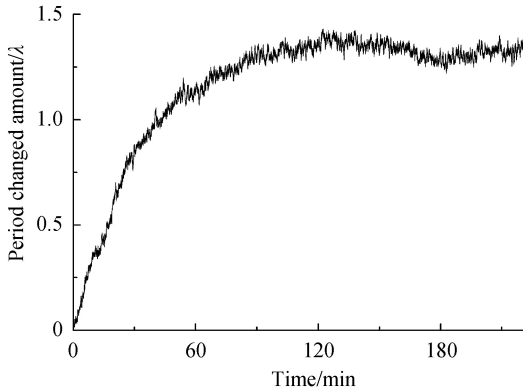
(c) Groove shape observed at middle of the grating by AFM with prolonged exposure time

图3 条纹平移未锁定时的状态

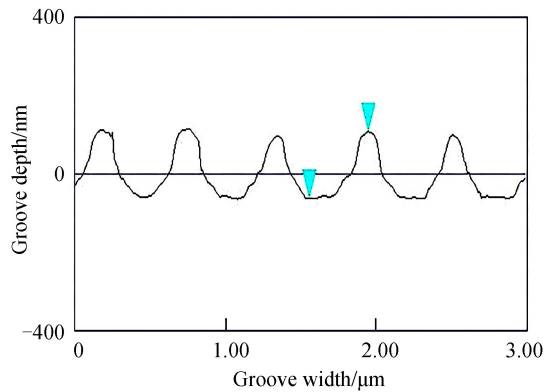
Fig.3 Fringe translation variation without locking system

3.2 未锁定时条纹的周期变化情况

长时间曝光时,元件受温度变化的影响产生热胀冷缩,会对光束的角度产生干扰,此外点光源位置的变化也会对条纹周期产生直接影响.若在未锁定A处平移的情况下直接检测周期变化,由于没有基准位置,无法通过周期数的增加放大周期变化,因而检测周期变化时需要在A处锁定平移的条件下进行.检测周期的两监视系统(B、C)之间的距离为230 mm.实验结果如图4(a)所示($200 \times 1\,740$ 个条纹的总周期变化量).未锁定时条纹的周期变化非常明显,RMS值达到 1.20λ ,数值模拟对比度结果为67.37%.图4(b)为在AFM下观察到的光栅槽型,周期变化未锁定时槽型较差且对比度下降严重.



(a) Period variation



(b) Groove shape observed by AFM at edge of the grating

图4 周期未锁定时的状态

Fig.4 Period variation without locking system

相比于 $200\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 尺寸光栅,大尺寸光栅干涉条纹的周期变化量会与其尺寸成线性放大,未锁定期时会对光栅质量产生更严重的影响,因而对于米级大光栅的曝光必须锁定条纹平移和周期.

3.3 锁定后条纹平移和周期的变化情况

在 $200\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 尺寸光栅上同时锁定条纹平移和周期,检验锁定效果.采用锁定系统后条纹平移和周期的变化情况如图5(a)、(b)所示.

根据实验数据计算出条纹锁定后的平移RMS值为 $0.001\,6\lambda$,由于系统能检测到的最小平移量为 $0.008\,3\lambda$,因而此时RMS值已经无法准确衡量平移锁定效果.RMS值失效的原因是大部分时间内条纹的平移量小于能够检测的最小平移量,拉低了数据的平均值.采用统计学 3σ 值衡量锁定效果, 3σ 值为 0.009λ ,对比度数值模拟结果为99.99%.周期锁定的RMS值为 0.017λ ,由于锁定的是整体周期变化($200 \times 1\,740$ 个周期),平均单周期变化量为 $4.89 \times 10^{-8}\lambda$,边缘处条纹对比度数值模拟结果为99.77%.图5(c)、(d)为AFM观察到的光栅中间和边缘处槽型,对比未锁定时的图3(c)和图4(b),光栅槽型和对比度得到明显改善,实现了较好的条纹锁定效果.

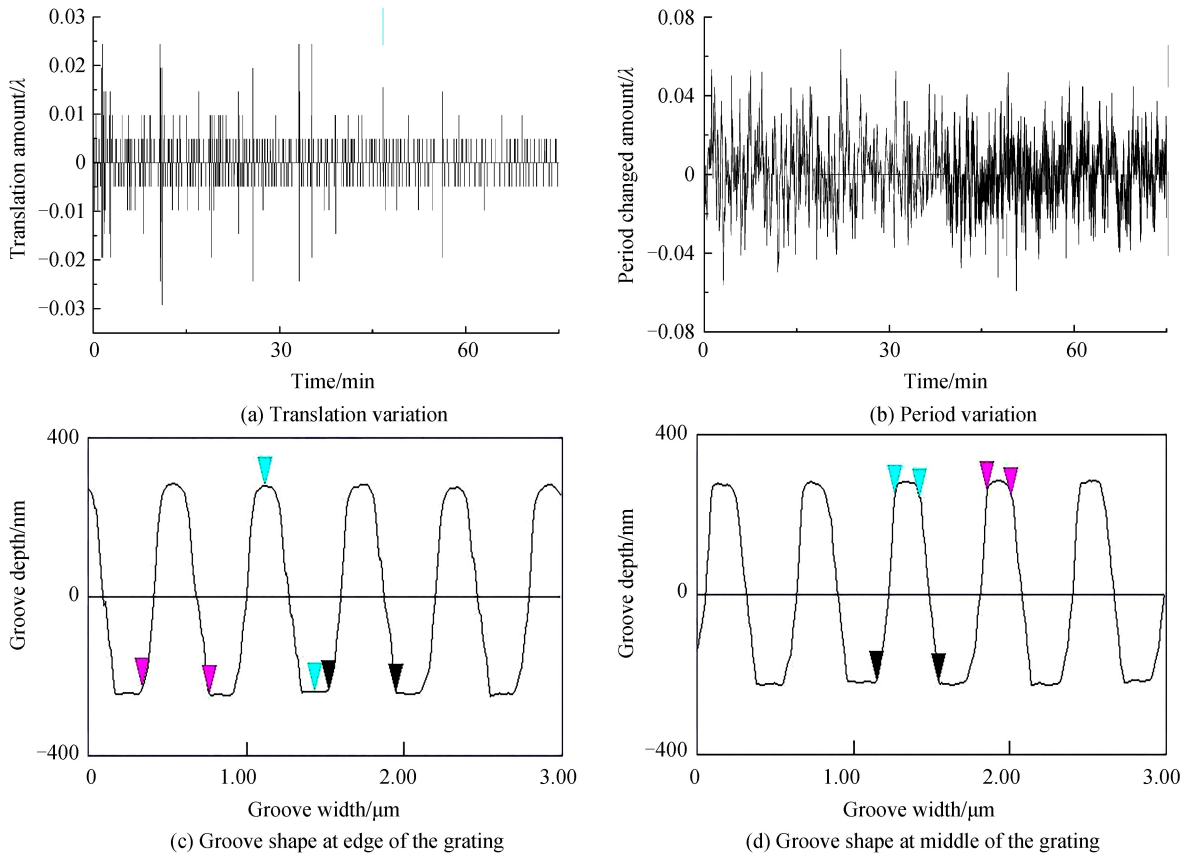


图5 锁定后条纹的变化情况

Fig.5 Fringe variation with locking system

3.4 周期锁定和平移锁定之间的干扰分析

PZT₁为单轴运动,通过调节光程差补偿条纹平移,不会影响光束角度,即当补偿平移时不会对条纹周期产生影响.当PZT₂补偿周期变化时,可能同时也改变了两光路的光程差,会对平移锁定造成干扰.设计了相关实验以检验该干扰是否会影响平移锁定的精度,根据图4的数据,使PZT₂按周期为0.2 Hz,幅值为 1λ 的正弦波信号运动,该模式下PZT₂位移远大于锁定周期时的补偿位移,检测此时平移锁定是否受到干扰.实验结果如图6,此时平移锁定的精度 3σ 值为 0.008λ ,对比图5(a)和图6,可以看出,周期锁定对平移锁定无明显影响.锁定周期时检测的周期变化值是整体变化,即使周期补偿的瞬时值达到 1λ ,平均到单个周期的变化量为 $2.87 \times 10^{-6}\lambda$,即由于周期补偿导致的A处条纹移动仅为 $2.87 \times 10^{-6}\lambda$,相比于平移锁定的精度 $8.3 \times 10^{-4}\lambda$,该影响可以忽略.

4 结论

全息光栅曝光时,温度变化、振动等外界干扰会使双光束的光程差和光束夹角产生变化,造成条纹的平移和周期变化.本文通过实验分析了200 mm宽的全息光栅曝光过程中干涉条纹的变化情况,当长时间曝光时,干涉条纹的平移和周期变化的RMS值分别达到 1.87λ 和 1.20λ ,严重影响光栅的对比度.

通过采用3组条纹监视机构和2组PZT补偿执行机构,实现了全息光栅曝光过程中的条纹平移和周期的二维锁定.从实验结果看,平移锁定 3σ 值为 0.009λ ,对比数值模拟结果为99.99%;周期的锁定的RMS

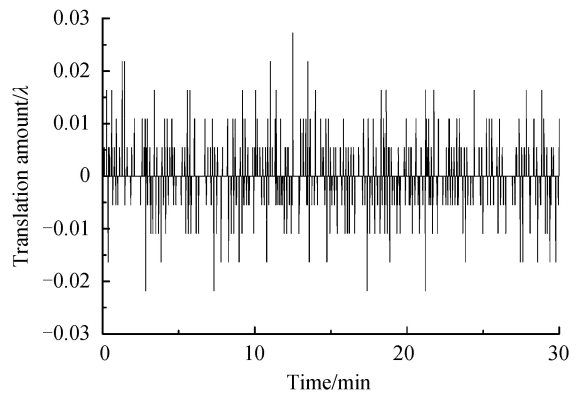


图6 周期锁定对平移锁定的影响

Fig.6 The influence of period lock on translation lock

值为 0.017λ , 平均单周期变化量为 $4.89 \times 10^{-8}\lambda$, 对比度为 99.77%, 实现了较好的锁定效果. 而且条纹平移锁定和周期锁定同时工作时, 相互干扰非常小. 通过本条纹锁定机构的实施, 将极大降低大尺寸光栅曝光系统对外界环境、稳定时间等条件的要求, 降低实验室建造成本并提高使用效率.

参考文献

- [1] CLERY D. Laser fusion energy poised to ignite[J]. *Science*, 2010, **328**(5980): 808-809.
- [2] BARNES S I, COTTRELL P L, ALBROW M D, *et al.* The optical design of the Southern African large telescope high resolution spectrograph; SALT HRS[C]. SPIE, 2008, **7014**: 70140K.
- [3] MA Dong-han, ZENG Li-jiang. Fabrication of low-stray-light gratings by broad-beam scanning exposure in the direction perpendicular to the grating grooves[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(7): 1346-1349.
- [4] 石磊. 大尺寸衍射光栅的制造[D]. 清华大学, 2011.
- [5] QIAN Guo-lin, LI Chao-ming, YIN Qing-yan, *et al.* Study of characteristic of fringe locking system used to holographic exposure[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(6): 648-650.
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.
- [6] LU Sen, YANG Kai-ming, ZHU Yu, *et al.* Effect of period setting value on printed phase in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(1): 0123001.
鲁森, 杨开明, 朱煜, 等. 干涉条纹相位锁定系统分析及其控制[J]. 光子学报, 2017, **46**(1): 0123001.
- [7] SONG Ying, Bayanheshig, QI Xiang-dong, *et al.* Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(2): 318-324.
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.
- [8] LI Chao-ming, CHEN Xin-rong, WU Jian-hong, *et al.* Research and development of a stabilizing holographic interference fringe system based on linear CCD[C]. SPIE, 2009, **7384**: 73840C-73840C-6.
- [9] 李晓阳. 大口径全息干涉光场稳定性研究[D]. 苏州大学, 2016.
- [10] WANG Lei-jie, ZHANG Ming, LU Sen, *et al.* Ultra-precision control of homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(5): 1213-1221.
王磊杰, 张鸣, 鲁森, 等. 零差移频式干涉图形相位锁定系统的超精密控制[J]. 光学精密工程, 2017, **25**(5): 1213-1221.
- [11] YOUNG P P, PRIAMBODO P S, MALDONADO T A, *et al.* Simple interferometric fringe stabilization by charge-coupled-device-based feedback control[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(19): 4563.
- [12] GUEST C C, GAYLORD T K. Phase stabilization system for holographic optical data processing[J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(14): 2140.
- [13] WANG Li, LU Bing-heng, DING Yu-cheng, *et al.* A novel two-step alignment technique for imprint lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1608-1612.
王莉, 卢秉恒, 丁玉成, 等. 压印光刻中的两步对正技术[J]. 光子学报, 2006, **35**(10): 1608-1612.
- [14] SONG Ying, ZHAO Xu-long, JIANG Yan-xiu, *et al.* Design of frequency-shift interference fringe locking system in holographic grating exposure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(5): 1-16.
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): 1-16.
- [15] LIU Zhen, LI Sheng, FENG Chang. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(5): 202-207.
刘振, 李声, 冯常. 基于互相关算法的激光条纹中心提取[J]. 中国激光, 2013, **40**(5): 202-207.