

doi: 10.3788/gzxb20174601.0123001

干涉条纹相位锁定系统分析及其控制

鲁森, 杨开明, 朱煜, 张鸣, 王磊杰, 胡楚雄

(清华大学 机械工程学院 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要:干涉条纹的相位变化与干涉条纹中某一固定点的光强密切相关, 基于这一原理, 通过对干涉场光强分析, 提出并设计了一种用于干涉条纹相位锁定的控制系统. 光电探测器检测干涉条纹中固定目标点的光强, 并以该光强电压作为反馈控制信号, 利用声光调制器对干涉系统中两束高斯光束中的一束进行实时频率调制, 将光强电压控制在一个固定值, 实现干涉条纹的相位锁定. 构建了条纹锁定控制系统控制对象的理论模型, 通过实验进行了验证, 并基于该模型的特点设计了条纹锁定控制器. 实验结果表明: 在 400 Hz 的控制频率下, 干涉条纹相位漂移不超过 ± 0.04 个条纹周期, 满足干涉光刻的曝光需求.

关键词:相位锁定; 声光调制器; 实时控制; PID; 频率调制

中图分类号: O436.1; O438.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0123001-7

Analysis and Controller Design of Fringe Phase Locking System for Interference Lithography

LU Sen, YANG Kai-ming, ZHU Yu, ZHANG Ming, WANG Lei-jie, HU Chu-xiong

(State Key Laboratory of Tribology, School of Mechanical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The intensity of a fixed point in the interference fringes is closely related to the phase change of interference fringes. According to this principle, a real-time phase locking system was established by the analysis of the intensity field. The intensity voltage of a fixed point in the interference fringes was detected as a feedback signal by a photodetector, and an acoustic optical modulator was used to shift the frequency of the Gaussian beam in real time. By setting intensity voltage to a fixed value, phase locking function was realized. Theoretical model of fringe phase locking system was derived and verified by experiment. A phase locking controller was also designed based on the model. The experiment results illustrate that, the phase drift is within ± 0.04 period under the 400 Hz control frequency, which satisfies the exposure requirements of interference lithography.

Key words: Phase lock; Acoustic optical modulator; Real time control; PID; Frequency modulation

OCIS Codes: 230.1040; 120.2650; 120.5060; 260.3160

0 引言

在干涉曝光系统中, 两束高斯光束在基底上相互干涉形成明暗相间的干涉条纹. 在地面振动、空气扰动等外界环境干扰下, 干涉条纹的相位会发生漂移, 严重影响曝光效果^[1]. 通常可以采用环境控制^[2]、反馈控制^[3]的方法降低扰动带来的影响.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51475262)资助

第一作者: 鲁森(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为扫描干涉光刻系统. Email: lus13@mails.tsinghua.edu.cn

导师: 朱煜(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为 IC 制造装备的超精密机械系统设计、超精密测量、超精密运动控制等. Email: zhuyu@tsinghua.edu.cn

通讯作者: 杨开明(1970-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为集成电路制造装备超精密运动控制理论及技术. Email: yangkm@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2016-07-14; 录用日期: 2016-09-23

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

环境控制通过减少空气扰动,降低光学仪器的振动来提高条纹相位的稳定性.但要达到干涉曝光所要求的准确度,环境控制的成本很高.通过对干涉光频率进行调制或改变光程差的方法也可以达到锁定干涉条纹相位的目的^[4-5].通常在一定的环境控制下,同时对条纹相位进行锁定控制,从而达到干涉曝光的准确度要求.

传统的相位锁定系统采用压电陶瓷作为执行器件,但存在调节速度慢、调节相位有限的缺点^[6].电光调制器(普克尔盒)有较快的调节速度,但最大调节相位只有 2π .声光调制器(Acoustic Optical Modulator, AOM)可以实现 100ns 级的响应速度和无限大的相位调节范围^[7],满足干涉条纹相位锁定的应用要求.

本文设计了干涉条纹的相位锁定及其控制系统并进行了实验研究.基于干涉曝光原理构建了干涉条纹相位锁定控制系统,推导干涉信号光强的数学模型,采用 AOM 调频的方法实现相位控制.推导条纹锁定控制系统被控对象的理论模型并进行实验验证,针对被控对象模型特点设计相位锁定控制器.最后通过实验验证系统干涉条纹的相位控制有效性.

1 相位锁定控制系统及其工作原理

本文研究的干涉曝光系统组成结构框图如图 1,它包括激光器、分光镜、声光调制器、频率合成器、光电探测器、数据采集卡和工控机.激光从激光器出射后,通过一块非偏振分束镜后分成两路并分别通过两个声光调制器 AOM_1 和 AOM_2 .通过调整声光调制器的角度实现布喇格衍射条件,使得出射的 -1 级衍射光光强达到最大值,并用挡光板挡住从声光调制器中出射的 0 级光.两路 -1 级衍射光经过反光镜和分光镜后,分光镜的透射光以一定的角度在基底上形成干涉图案,同时两束分光镜的反射光合光后进入光电探测器.光电探测器将光强信号转化为电压信号送入数据采集卡中,在 RTX(Real-time eXtension)实时系统下完成相位锁定反馈控制,相位锁定控制量通过高速串口输出到频率合成器中,从而实现对干涉条纹相位的实时控制.在闭环控制的条件下,基底上干涉条纹相位在小范围内变化,此时可以认为相位与光电探测器检测到的光强变化呈线性关系.

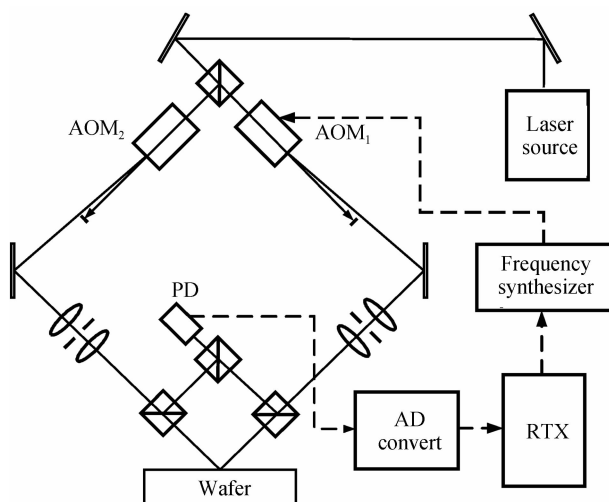


图 1 干涉条纹相位锁定系统

Fig. 1 Interference image phase control system

激光器出射光为高斯光束,高斯光束的束腰处波前可近似看作平面波.通过调整光路令高斯光束的束腰刚好在基底处相互干涉,从而减少干涉条纹的相位非线性.

研究平面波的干涉场强分布分析光刻胶的曝光情况.两列平面波表示为^[8]

$$\begin{cases} W_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ W_2(t) = A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (1)$$

干涉场中任一点为两列波的叠加,即

$$W(t) = W_1(t) + W_2(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

在任一点处的光强 I 表示为

$$I = [W_1(t) + W_2(t)]^2 = \frac{A_1^2 + A_2^2}{2} + \frac{A_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t + 2\varphi_1) + \frac{A_2^2}{2} \cos(2\omega_2 t + 2\varphi_2) +$$

$$A_1 A_2 \{ \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] + \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)] \}$$

式中, ω_1 和 ω_2 为极大的光频, 达到 PHz($1P=10^{15}$) 级别, 远远超出光电探测器的频响范围, 故在式(3)中去除高频项^[9]可得

$$I = A^2 \{ 1 + \gamma \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \}$$

式中背景光强 $A^2 = (A_1^2 + A_2^2)/2$, 曝光对比度 $\gamma = 2A_1 A_2 / (A_1^2 + A_2^2)$, 当 $A_1 = A_2$ 时, 曝光对比度为 1, 此时曝光效果最好^[10].

在式(4)中加入由外界干扰而引起的相位变化 $\varphi_e(t)$ 得

$$I = A^2 \{ 1 + \gamma \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_e(t) + \varphi_0] \} = A^2 [1 + \gamma \cos(2\pi f t + \varphi_e(t) + \varphi_0)]$$

式中, $f = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\pi}$, $\varphi_0 = \varphi_1 - \varphi_2$.

光电探测器检测到的电压大小与光强成正比, 即

$$U \propto I$$

因此, 电压信号可表示为

$$U = U_0 [1 + \gamma \cos(\Phi + \varphi_0)]$$

式中 $\Phi = 2\pi f t + \varphi_e(t)$, U_0 为常量.

式(7)中的电压信号作为控制系统的反馈信号. 要实现相位锁定控制还需要知道被控对象的数学模型及其特点. 在第 2 节中将相位锁定控制系统的控制对象模型进行理论推导并进行实验辨识, 从而验证辨识模型的准确性.

2 相位锁定控制模型

图 2 为相位锁定系统的结构框图, 它主要由条纹锁定控制器、频率合成器、光电探测器组成. 在本系统中, U_r 为参考电压, 将光电探测器测得的电压值 U_o 与 U_r 的差值 U_e 作为被控量, 通过条纹锁定控制器 $C(s)$ 得到频率值输出 f , 频率值 f 经过 AOM 的积分效应得到对应相位调整量 φ , 用于抵消外界扰动引起的相位变化 φ_e . Φ 表示 φ 与 φ_e 之和, 其与 U_o 之间的关系如式(7).

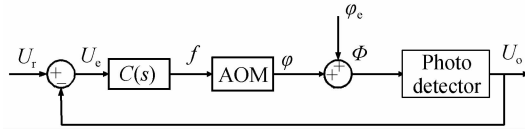


图 2 相位锁定系统控制框图

Fig. 2 Block diagram of phase locking control system

2.1 理论模型建立

在连续系统中, 相位与频率之间的关系为

$$\varphi = \omega t = 2\pi f t$$

当 f 随时间变化时

$$\varphi = 2\pi \int f(t) dt$$

在数字系统中, 不考虑延迟的情况下相位与频率之间的关系为

$$\varphi[k] = \varphi[k-1] + 2\pi T f[k-1], k=2, 3, \dots$$

实际情况下必须考虑延迟对系统的影响, 因此频率合成器的差分方程可表示为^[11]

$$\varphi[k] = \varphi[k-1] + 2\pi(T - T_d) f[k-1] + 2\pi T_d f[k-2], k=3, 4, \dots$$

式中, T 表示控制周期, T_d 表示从光电探测器采集到的光强信号到频率合成器生成新的频率值之间的时间延迟, 该时间延迟通过示波器测得 T_d 约为 2.15 ms. 式(11)的物理涵义是: 以第 $k-1$ 个控制周期为例, 在延迟时间 T_d 内, 频率合成器还没有生成频率值 $f[k-1]$, 而是保持上一个周期生成的频率值 $f[k-2]$, 故在 T_d 时间内相位变化 $2\pi T_d f[k-2]$, 在该周期余下时间 $T - T_d$ 内, 相位变化 $2\pi(T - T_d) f[k-2]$.

对式(11)中的 $\varphi[k]$ 进行 Z 变换,有

$$H(z) = \frac{\varphi(z)}{f(z)} = \frac{2\pi[(T-T_d)z + T_d]}{z^2 - z} \quad (12)$$

通过设定初始相位为

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2} + k\pi, k=0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

使参考电压 U_r 等于式(7)中的 U_0 . 在闭环情况下 Φ 很小,因此式(7)可近似为

$$U = U_0[1 + \gamma \cos(\Phi + \varphi_0)] = U_0(1 \pm \gamma \sin \Phi) = U_0 \pm \gamma U_0 \cdot \Phi \quad (14)$$

在当前实验条件下测得 U_0 值为 4.436 V, γU_0 值为 0.905 V.

综上,被控对象传递函数为

$$P(z) = \frac{U(z)}{f(z)} = \frac{U(z)}{\Phi(z)} \cdot H(z) = \gamma U_0 \cdot \frac{2\pi[(T-T_d)z + T_d]}{z^2 - z} \quad (15)$$

将各参量值代入式(15)中得

$$P(z) = \frac{0.001990z + 0.01223}{z^2 - z} \quad (16)$$

2.2 实际模型辨识及验证

通过闭环辨识的方法得到被控对象的传递函数^[12],从而验证 2.1 节中得到的理论模型的准确性. 辨识过程如图 3, 闭环控制情况下,在被控对象的输入端施加激励信号 e ,同时记录输入信号 q 和输出信号 U_o ,获得被控对象 $P(s)$ 的非参量频响模型,再通过参量拟合的方法得到被控对象参量模型.

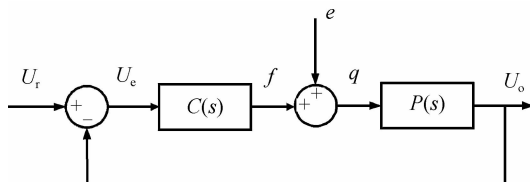


图 3 模型闭环辨识过程框图

Fig. 3 Block diagram of closed-loop identification

图 4 为辨识实验结果,其中点划线代表辨识数据,虚线代表拟合得到的辨识模型,实线代表理论模型. 辨识模型与理论模型的相频曲线基本重合,幅频曲线仅在 200 Hz 附近存在微小差异,其主要来自于系统延迟的影响. 辨识曲线中的毛刺主要来自量化噪声和振动的影响. 从上述分析可以判断,理论模型是准确的,可用于控制器的设计.

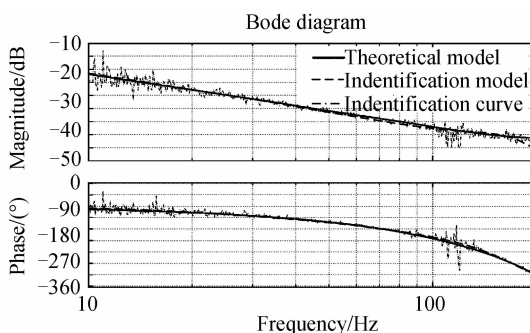


图 4 理论模型与辨识模型 Bode 图对比

Fig. 4 Bode diagrams of theoretical and Identification model

2.3 模型分析

从式(16)可以看出,被控对象由一个积分环节和一个延迟环节组成. 积分环节反映了条纹相位的变化与干涉光频率变化的关系:对某一段时间内的频率变化进行积分,再乘以 2π ,即可转变为对应的相位变化. 积分环节在图 4 中为一条斜率为 -20 dB,穿越 0 dB 的直线. 其与 0 dB 的交点对应的频率值即为系统带宽. 图 4 中的系统带宽远小于 10 Hz,达不到系统所需的响应速度,需要通过提高增益的方法提高系统带宽.

延迟环节主要来自于系统产生中断的时间、读取数据的时间、运算时间、数据在各器件之间传输的时间

以及 AOM 中声波传输的时间. 当系统中存在延迟环节后, 其幅频特性不受影响, 相频特性增加一个相位滞后, 使系统稳定性变差.

针对被控对象以上特点, 采用经典的比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制器对其控制, 不但可以保证控制系统的稳定性和鲁棒性, 还可以有效地保证系统的稳态性能和动态特性, 实现条纹相位锁定功能.

3 相位锁定控制方法

根据上一节得到的相位锁定控制系统的被控对象传递函数及系统控制要求, 针对控制对象特点进行控制器及控制算法设计, 从而实现干涉条纹相位锁定功能. 利用经典的反馈控制器设计方法, 根据 Ziegler-Nichols 设计准则可以得到一组 PID 控制器参量^[13], 将该控制器参量应用到系统中, 检验是否满足幅值裕度和相位裕度的要求.

首先调节比例系数, 直到闭环系统输出为等幅振荡, 记录极限增益 $K_u=80$ 和振荡周期 $T_u=0.01$.

经典 PID 控制器的传递函数为^[14]

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i} \cdot \frac{1}{s} + K_p T_d \cdot s \quad (17)$$

应用 Ziegler-Nichols 法, 可以得到控制参量为 $K_p=0.6K_u$, $T_i=0.5T_u$, $T_d=0.125T_u$. 将得到的参量代入 PID 控制器中, 绘制系统开环传递函数 Bode 图, 如图 5 所示. 从图 5 中可以看出, 当前控制器参量下, 系统带宽为 20 Hz, 系统幅值裕度为 6 dB, 相位裕度为 45° , 满足系统性能要求.

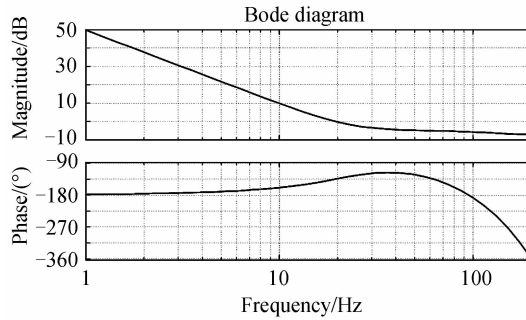


图 5 开环传递函数 Bode 图

Fig. 5 Bode diagram of open loop transfer function

4 实验验证

本文光源采用 Cobolt 公司的 Zouk 型激光器, 激光波长为 355 nm, 功率为 20 mW. 采用 IntraAction 公司的声光调制器(型号 SDM-1052B8.35)和频率合成器(型号 MFE-1054C32-2), 其中声光调制器的中心频率为 105 MHz, 频率合成器的调频范围 75~125 MHz, 射频信号功率 0~4 W, 频率最小变化量为 10 Hz. 选用 Thorlab 公司的 PDB440A 型光电探测器作为光电转换器件, 选用研华 1716L 板卡实现模拟信号数据采集.

频率合成器共有 3 路通道, 实验中只使用其中 2 路. 每个通道都配有对应的功率放大器, 最高可出射 4 W 的射频信号. 为了达到较高的对比度和较大的曝光强度, 使用 2 路通道均设置为 4 W 输出. 两个声光调制器的初始频率都设置为 105 MHz, 调整光路使出射的一级衍射光在基底重合, 形成干涉场. 同时通过分光棱镜的反射, 使两束衍射光以近似平行的角度入射到光电探测器中. 为了尽可能减小外界干扰, 采用差分输入的方式将光电探测器的输出电压接入数据采集卡. 图 6 为本文所搭建的相位锁定系统实验装置.

设定控制频率为 400 Hz, 目标电压为 4.436 V, 目标相位为 $-\pi/2$, 以采集到的电压值为反馈信号, 当采集到的电压值保持不变时则认为干涉条纹的相位不变. 图 7 为 50 s 内采集的电压数据, 从图 7 可以看出: 开环情形下, 条纹相位呈漂移状态, 光电探测器探测到的电压在 3.5 V~5 V 之间变化; 闭环条件下, 条纹相位被锁定, 电压在均值 4.4 V 附近小范围波动. 通过计算可以得到, 闭环段电压误差的 3σ 值为 0.229 3 V, 所对应的相位变化为 0.256 2 rad, 约为 0.04 个干涉条纹周期, 满足曝光要求^[15].

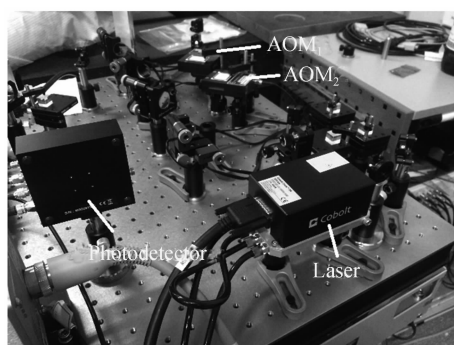


图6 条纹锁定系统实验装置

Fig. 6 Experimental facility of fringe locking system

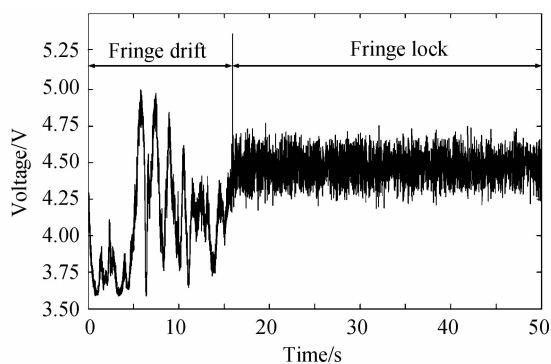


图7 开环和闭环情形下电压变化情况

Fig. 7 Change of voltage with feedback off and on

对条纹漂移数据和条纹锁定数据做累积幅值谱(Cumulative Amplitude Spectrum, CAS)分析,从图8的分析结果可以看出,条纹锁定系统对0~200 Hz频段上的误差均有很好的抑制效果,但CAS曲线仍呈缓慢上升趋势,特别是100 Hz附近有明显上升,这主要是系统带宽限制造成的.要得到更好的锁定效果,还可以通过对系统的检测和执行器件进行升级来进一步保证.

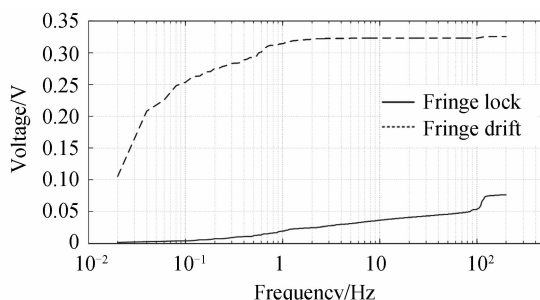


图8 CAS累积幅值谱分析

Fig. 8 Cumulative amplitude spectrum analysis

5 结论

为了满足干涉光刻系统相位锁定控制的需求,本文设计了一种基于干涉条纹光强检测的实时反馈控制系统,通过频率合成器和声光调制器对干涉系统中一束干涉光频率进行实时调制,基于电压信号的控制方式实现对条纹相位的锁定控制.实验结果表明,在400 Hz的控制频率下,干涉条纹相位漂移在 ± 0.04 个条纹周期内,满足干涉光刻实际曝光需求.目前系统频率合成器分辨率仅为10 Hz,限制了最终相位锁定准确度.下一步将通过采用更高分辨率的频率合成器解决这一问题.此外相位锁定准确度还受激光功率稳定性影响,将通过多通道的相位解算方法进一步提高相位锁定准确度.

参考文献

- [1] FERRERA J. Nanometer-scale placement in electron-beam lithography[D]. Cambridge; Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [2] ZHAO Y, TRUMPER D L, HEILMANN R K, *et al.* Optimization and temperature mapping of an ultra-high thermal stability environmental enclosure[J]. *Precision Engineering*, 2010, **34**(1): 164-170.
- [3] HAEFER M, PRUSS C, OSTEN W. Laser direct writing of rotationally symmetric high-resolution structures[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(31): 5983-5989.
- [4] 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): 4563-4566.
- [5] HREBABETZKY F, ALBERTAZZI J A, VEIGA C L N. Camera-based active phase stabilization for electronic holography[C]. *Laser Metrology for Precision Management and Inspection in Industry*. International Society for Optics and Photonics, 2001: 155-161.
- [6] 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. 移频式全系光栅曝光条纹干涉锁定系统的设计[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(2): 318-

324.

- [7] HEILMANN R K, KONKOLA P T, CHEN C G, *et al.* Digital heterodyne interference fringe control system[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2001, **19**(6): 2342-2346.
- [8] 赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社,1984.
- [9] TANG Jun-xiong. Optical beating and interference[J]. *College Physics*, 1990, (1): 10-12.
汤俊雄. 光拍频和干涉现象[J]. 大学物理, 1990, (1): 10-12.
- [10] MA Li-na, ZHANG Jin, JIANG Shi-lei, *et al.* Influence on patterns quality of multi-beam interference lithography caused by the deviations of incidence azimuth angle and intensity of light[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 1011003.
马丽娜, 张锦, 蒋世磊, 等. 入射光束角度及强度偏差对多光束干涉光刻结果的影响[J]. 光子学报, 2015, **44**(10): 1011003.
- [11] KONKOLA P T. Design and analysis of a scanning beam interference lithography system for patterning gratings with nanometer-level distortions[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [12] FORSSELL U. Closed-loop identification: methods, theory, and applications[D]. Sweden: Linköping University, 1999.
- [13] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic controllers [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1993, **115**(2B): 759-768.
- [14] 董景新. 控制工程基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [15] 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): 648-654.
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): 648-654.