

文章编号 1004-924X(2017)05-1213-09

零差移频式干涉图形相位锁定系统的超精密控制

王磊杰, 张鸣*, 鲁森, 朱煜, 杨开明

(清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室

精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要:利用全息曝光法制造大口径全息平面光栅时,常引入零差移频式干涉图形相位锁定系统来提高全息曝光质量。本文针对直接影响最终干涉曝光精度的系统控制精度开展研究。首先,介绍了新型的零差移频式干涉图形锁定系统的原理和结构,在系统理论建模及模型辨识的基础上,针对非线性系统模型进行了高阶线性化拟合,并结合系统振动测试实验结果,设计了系统控制器。然后,对设计的控制器进行了实际控制调试,实现了系统的超精密控制。最后,针对系统控制误差纹波,采用频域分析方法揭示了影响系统控制精度的主要因素,提出了未来提升系统控制精度的方法。测试结果显示:系统相位锁定控制精度可达 $\pm 0.0461 \text{ rad}(3\sigma)$ 且以高频误差纹波形式呈现。分析了高频误差纹波的成因,指出受系统噪声、延迟、控制器参数等因素限制,控制器很难完全抑制频段跨度大而连续的高频微振动引起的干涉图形相位漂移。

关键词:全息曝光;零差移频式干涉图形相位锁定系统;系统辨识;高阶线性拟合;微振动;PID控制

中图分类号:TN305.7;O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1213

Ultra-precision control of homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system

WANG Lei-jie, ZHANG Ming*, LU Sen, ZHU Yu, YANG Kai-ming

(State Key Laboratory of Tribology, Beijing Key Laboratory of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control,

Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: zm01@mails.tsinghua.edu.cn

Abstract: When larger aperture holographic plane gratings are fabricated by the holographic exposure method, the homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system usually is used to improve the holographic exposure quality. This paper focuses on the ultra-precision control of the system. Firstly, the principles and structures of a novel homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system were introduced. The high-order linear model was fitted for a nonlinear model of the system based on the theoretical modeling and system identification and a controller of the system was designed by combining the fitting model and the system vibration test result. Then, an actual controlling test was performed based on the design result of the controller to implement the ultra-precision control of the system. Finally, an analysis method on frequency domain was used to

收稿日期:2016-10-24;修订日期:2016-12-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51677104);中国博士后科学基金资助项目(No. 2017M610885)

explore the effect factors on control precision for the ripple wave in the system. The experiment results demonstrate that the controlling error of the system has reached to $\pm 0.0461 \text{ rad}(3\sigma)$ and it shows high frequency error ripple wave. The causes of the high frequency error were researched, and the results indicate that limited to the noise, delay of the system and controller parameters, the drift of the interference pattern caused by continuous micro-vibration with a wide frequency range can not be completely restrained by the controller.

Key words: holographic exposure; homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system; system identification; high order linear fitting; micro-vibration; PID control

1 引言

作为惯性约束核聚变激光驱动装置脉冲压缩机^[1]、193ArF 浸没式步进扫描光刻机^[2-3]的核心器件,大口径高精度全息平面光栅具有非常重要的应用。目前,大口径全息曝光法^[4-5]及其衍生方法^[6-9]是制造这类光栅的主要方法。用全息曝光法制造光栅时,环境波动、振动等外界干扰会引起干涉图形相位漂移,从而导致曝光对比度的下降,最终降低全息光栅的制造精度。为确保全息曝光质量,诸多学者在全息光栅曝光装置中引入了反馈式的干涉图形相位锁定系统^[7, 10-17],如压电陶瓷作动器(PZT)调相-图像传感器(CCD)反馈式锁定系统^[7, 10-11]、PZT^[12]/电光调制器(EOM)^[13]/声光调制器(AOM)^[14-15]调相-光电探测器(PD)电压反馈式锁定系统、外差移频式相位锁定系统^[16]以及零差移频式干涉图形相位锁定系统^[17]等。对比其他几种系统,文献^[17]阐述的零差移频式干涉图形相位锁定系统具有光路简而短、激光利用率高、精度高等优势,适用于构建大口径全息曝光装置、全息曝光拼接装置及扫描干涉光刻装置,便于实现装置性能的优化、经济成本的降低。

控制精度是干涉图形相位锁定系统的核心性能指标,直接影响最终的干涉曝光精度。外界扰动、系统机械结构、控制硬件水平以及控制器参数的选择等均会影响系统的最终控制精度。文献^[7, 10-15]针对所提出的系统开展了控制实验并实现了一定的控制精度,但未见相关的控制器设计、控制硬件水平分析等控制研究。文献^[6, 18]虽从外界扰动、控制硬件水平及控制器参数选择上对外差移频式相位锁定系统的控制进行了全面深入研究,但是由于零差系统的诸多部件与外差系统的部件存在较大的差别,该研究难以直接应

用于零差移频式相位锁定系统。

作为零差移频式干涉图形相位锁定系统系列研究论文的其中一篇,本文在用系统控制理论建模及模型辨识的基础上,针对它的非线性系统模型进行了模型的高阶线性化拟合,结合系统光学器件振动测试实验,设计了系统控制器,并基于控制器设计结果进行了系统的控制调试,实现了 $\pm 0.0461 \text{ rad}(3\sigma)$ 的系统控制精度。针对系统控制误差纹波,采用频域分析方法揭示了影响系统控制精度的主要因素,提出了未来提升系统控制精度的方法。

2 系统介绍

2.1 系统原理

图 1 所示为零差移频式干涉图形锁定系统原理。一束毫米级口径的垂直偏振(s-polarization)紫外激光(波长 $\lambda=355 \text{ nm}$)经分光镜分光后,分别入射至声光调制器 AOM1 和 AOM2(起始驱动频率: $f_1 = f_2 = f$)后产生衍射,两个声光调制器的正一级衍射光分别经反射镜以相同的角度 θ 重叠入射至基底平面并形成全息微纳干涉图形(周期 $\Delta = \lambda/2\sin\theta$)。基底得到微纳干涉图形持续曝光即形成全息光栅掩模(周期为 Δ)。

在全息曝光过程中,受外界环境波动及振动的影响,基底处的全息微纳干涉图形会发生相位漂移而引起曝光对比度的降低,从而严重影响光栅的制造精度。这里在靠近基底处放置两个分光镜来提取少量曝光光束入射至零差冗余相位测量干涉仪(Homodyne Redundant Phase Measurement Interferometer: HRPMI),用于干涉图形相位漂移的测量,并将测量值反馈至控制器;控制器根据反馈值控制声光调制器 AOM1 连续移频进行干涉图形的相位调节,从而实现干涉图形相位漂移的抑制。系统原理的公式推导见于文献^[17]。

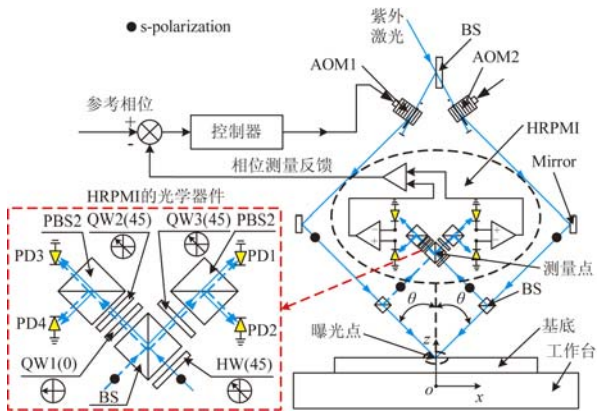


图 1 零差移频式干涉图形相位锁定系统原理

Fig. 1 Principle of homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system

2.2 系统实验装置

系统中的光学器件除了 HRPMI 是自主设计制造外,其余均为标准光学元件。所有光学器件均按照设计的光路精密定位夹紧至光学隔振平板上,光学器件的定位压紧仍采用传统的光学器件机械压紧方案,即压叉-套筒-支杆-镜座-光学器件,这里的压叉、套筒、支杆和镜座均采用商用标准件。图 2(a)所示为系统实验装置的光学器件及机械部件,实验装置光路如图中深灰线所示。

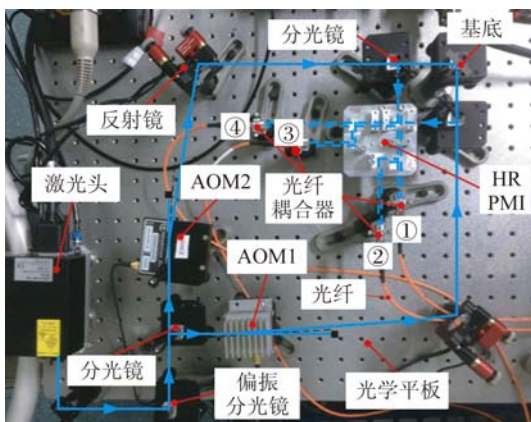
干涉图形锁定系统控制硬件架构基于高速 VME(Versa Module Eurocard)控制总线实现。系统控制硬件主要包括上位机、单板计算机、HRPMI 电子部件(接收器和数据采集卡)、并行 I/O 板卡、VME 机箱、频率合成器、功率放大器。单板计算机安装于 VME 机箱的背板上,数据采集卡通过 PMC 插槽安装在单板计算机上。

HRPMI 光学部件输出 4 路干涉信号,4 路信号分别经光纤传输至 2 个双通道的接收器(光功率/电压转换增益 2.5 V/mW,电路噪声 0.4 mV,输出带宽直流~15 MHz),干涉信号经接收器光电转化、放大后输出为 4 路模拟电压信号,模拟电压信号经数据采集卡(16 bit,±10 V 内 305.2 μV 噪声,300 Ks/s 采样速度)进行模/数转换后输入至单板计算机进行相位求解,单板计算机根据相位求解的结果计算 AOM1 的频率改变量,并将该频率改变量和起始驱动频率以 TTL 信号的形式通过 I/O 板卡(使用 32 个 TTL 信号输出端口)输入至 AOM1 的频率合成器(合成频率为 10~400 MHz,稳定性为 ±1 × 10⁻⁶/°C,分辨率为 0.233 Hz,合成时间优于 80 ns),频率合成器输出射频驱动信号,射频驱动信号经功率放大器放大后用于驱动 AOM1。同时,单板计算机也输出信号至 AOM2 的频率合成器,该频率合成器为 AOM2 提供固定的驱动射频信号。图 2(b)所示为系统实验装置的控制硬件,基于控制硬件所能实现的系统参数数值如表 1 所示^[17]。

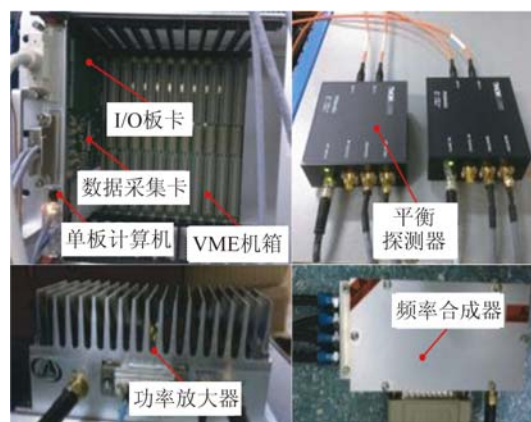
表 1 系统参数数值

Tab. 1 Parameter values of the system

参数	数值
相位测量分辨率/rad	0.000 8
相位调节分辨率/rad	0.000 3
伺服周期/μs	200
控制频率/kHz	5



(a) 光学器件及机械部件
(a) Optics and mechanics



(b) 控制硬件
(b) Control hardware

图 2 系统实验装置

Fig. 2 System experiment setup

单板计算机通过 RS232 串口和网口实现与上位机的通讯。单板计算机的程序开发基于 Tornado/Vxworks 环境实现。上位机控制软件基于 C++ 环境开发。

3 系统控制研究

3.1 系统控制框图

零差移频式相位锁定系统是典型的反馈式控制系统。干涉图形受外界扰动发生漂移,HRPMT 测量干涉图形的相位漂移量并反馈至控制器,控制器输出移频指令至频率合成器来控制声光调制器,改变光的频率进行干涉图形相位调节以实现干涉图形相位锁定。因此,系统的传递函数方框图如图 3。图 3 中: $G_c(s)$ 为控制器的传递函数, $G_s(s)$ 为频率合成器→放大器→AOM→HRPMT (包括光电接收器及数据采集卡)的系统器件的总传递函数。

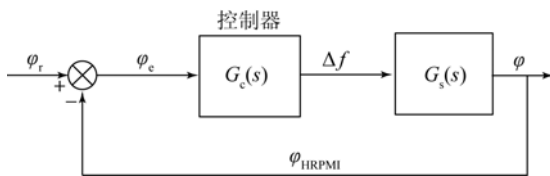


图 3 系统传递函数框图

Fig. 3 Control loop of transfer function

据图 3 的系统传递函数框图,系统控制误差可表示为:

$$\varphi_e = \varphi_r - \varphi_{HRPMT}, \quad (1)$$

式中: φ_r 为参考相位, φ_{HRPMT} 为 HRPMT 的相位测量反馈值。

通过对文献^[17]中式(8)求拉普拉斯变换,可得 $G_s(s)$ 的理论表达式为:

$$G_s(s) = \frac{\Phi(s)}{\Delta F(s)} = \frac{L(2\pi \int \Delta f dt)}{\Delta F(s)} = \frac{2\pi}{s}, \quad (2)$$

式中: s 为拉普拉斯算子, $\Phi(s)$ 为相位输出量的拉普拉斯变换, $\Delta F(s)$ 为频率控制量的拉普拉斯变换, L 表示拉普拉斯变换函数。

根据式(2)绘制 $G_s(s)$ 的伯德图,结果如图 4 (彩图见期刊电子版)所示。图 4 中红线表明:系统 $G_s(s)$ 理论模型由比例环节(比例常数为 2π)和积分环节构成。

3.2 系统控制模型辨识

实际上,受电子硬件的噪声和速度、光学延迟等因素的影响,系统实际模型与式(2)中的理论模型存在一定的差别。为准确获取系统模型,对系统开展了模型辨识实验。系统模型辨识实验的采样频率为 5 kHz,控制器采用比例控制器,辨识频率为 10~1 000 Hz,辨识频率分辨率为 0.5 Hz,系统模型的辨识结果如图 4 蓝线所示。辨识结果与理想模型对比结果显示:实际模型出现了幅值降低和相位延迟。

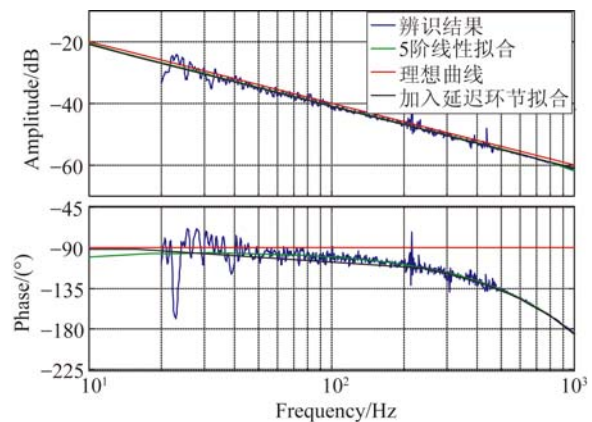


图 4 $G_s(s)$ 的伯德图

Fig. 4 Bode plot of the $G_s(s)$

为确定实际模型的幅值和相位延迟量,采用 $G_{s-delay}(s)$ 来逼近辨识结果:

$$G_{s-delay}(s) = \frac{K}{s} \cdot e^{-T_d s}, \quad (3)$$

式中: K 为实际传递函数的比例常数, T_d 为实际传递函数的延迟时间。

当(3)式中 $K=5.6$, $T_d=0.000 265$ 时,实际传递函数 $G_{s-delay}(s)$ 的伯德图如图 4 黑线所示,该线显示 $G_{s-delay}(s)$ 能同时在幅值和相位上很好地逼近辨识结果。因此,实际模型传递函数的比例幅值约为 5.6,相位延迟约为 265 μ s。

根据式(3)可知,带有延迟环节的 $G_{s-delay}(s)$ 模型是非线性的。由于非线性模型不适用于线性 PID(Proportional-Integral-Derivative) 控制器的设计,故对辨识结果进行了线性拟合。考虑到要实现很高的控制精度,选择线性拟合阶次为 5 阶。由于辨识结果中的低频部分不太准确,选择从 20 Hz 处对辨识结果进行线性拟合。如图 4 绿线所示为被控对象的 5 阶拟合模型的传递函数伯德

图,拟合得到高阶线性传递函数为:

$$G_{s-linear}(s) = \frac{A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4}{B_1 s^5 + B_2 s^4 + B_3 s^3 + B_4 s^2}, \quad (4)$$

式中: $A_1 = -1.804 \times 10^4$, $A_2 = 2.827 \times 10^8$, $A_3 = 4.939 \times 10^{11}$, $A_4 = 4.876 \times 10^{12}$; $B_1 = 1$, $B_2 = 1.184 \times 10^4$, $B_3 = 7.144 \times 10^7$, $B_4 = 8.604 \times 10^{14}$ 。

3.3 系统机械振动测试实验与分析

干涉图形的相位漂移主要来源于两干涉光路上的环境扰动和各个光学器件的微振动。通常,环境扰动是低频随机的,而微振动则贯穿于低频至高频并以尖峰的形式呈现(具体由隔振器性能和系统机械结构模态决定)。一般来讲,高频段的扰动抑制需要系统控制器具有大于扰动频率的控制带宽。兼顾考虑系统稳定性、调整时间、灵敏度峰值等设计指标时,控制带宽难以设计得很高。因此,为确保高精度抑制高频微振动引起的干涉图形相位漂移,需明确系统光学器件的微振动幅值及频率以实现合理的控制器设计。

由于微振动引起的干涉图形相位漂移由于涉光路上的各个光学器件的微振动通过一定的叠加方式得到,且各个光学器件振动情况不一致,故在图 2(a)所示的系统实验装置中构成干涉光路的光学器件上粘贴了加速度传感器以获取各个器件的微振动情况,进而全面掌握每个光学器件的振动情况对干涉图形相位漂移的影响。将图 2(a)中的光学平板隔振器打开,采用 B&K 公司的振动测试系统采集粘贴在各个光学器件安装座上的加速度传感器的信号,经 Pulse 软件处理得到系统各个光学器件的振动加速度幅值谱曲线如图 5 所示。

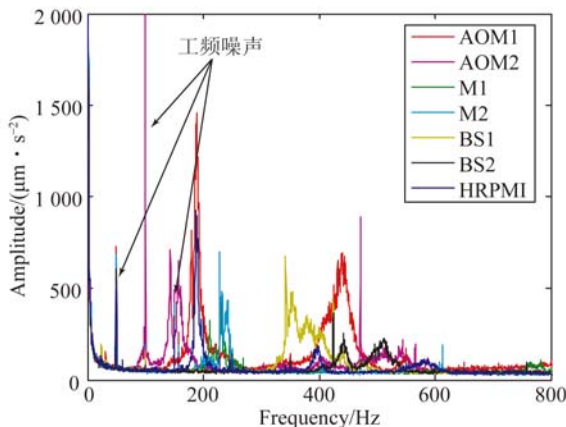


图 5 光学器件的振动加速度幅值谱

Fig. 5 Amplitudes of acceleration of optics vibration

图 5 中曲线显示:曲线中的尖峰是由各个光学器件的微振动导致的(50 Hz 及倍频尖峰为加速度传感器的工频噪声)。各个光学器件的振动峰的幅值和频率基本不一致,但部分微振动频率是重叠的,振动加速度幅值最高约为 $1\,500 \mu\text{m}/\text{s}^2$ 。此外,由于光学器件振动峰多且频段跨度大,各个光学器件振动幅值和频率将通过一定的叠加方式映射至干涉图形的相位漂移,故光路上各个器件的微振动叠加引起的干涉图形相位漂移在频率域上也将呈现频段跨度大且连续的形式。

3.4 PID 控制器设计

基于线性拟合得到的传递函数 $G_{s-linear}(s)$,结合系统机械振动测试分析结果,兼顾系统其他设计指标,设计了系统控制器。控制器采用了经典的 PID 控制器。

PID 控制器的设计需考虑四方面设计指标,一是系统控制带宽,二是系统稳定性,三是系统调整时间,四是系统稳态精度。第一,系统机械振动测试实验结果显示,系统控制带宽要大于 800 Hz 方能对高频振动引起的模态激发所带来的干涉图形相位漂移具有抑制作用,故系统带宽设计指标为 800 Hz。第二,为确保系统稳定性,以幅值裕度 $\geq 6 \text{ dB}$ 和相位裕度 $\gamma \approx 30^\circ \sim 60^\circ$ 为设计指标^[19]。第三,为确保系统具有足够的响应速度,以小于 3 ms 的调整时间为设计指标。第四,为确保系统控制精度,以灵敏度峰值 $\leq 6 \text{ dB}$ ^[20] 为设计约束。利用 MATLAB sisotool 设计满足以上四方面指标的 PID 控制器,设计发现仅利用比例控制($P=480$)即可满足上述设计指标。

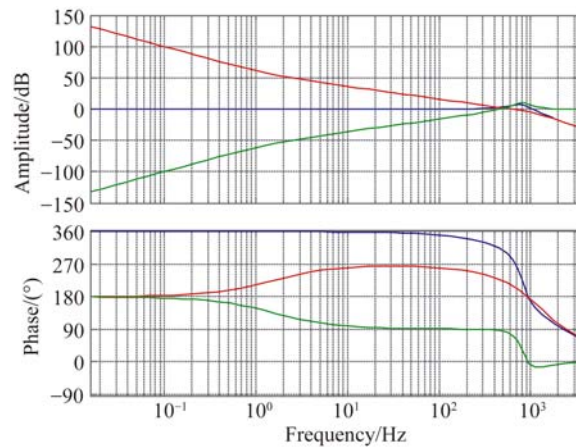


图 6 系统传递函数伯德图

Fig. 6 Bode plot of transfer function

图 6 和图 7 所示为在 $P=480$ 的控制器控制下的系统传递函数伯德图和阶跃响应。图中结果显示该控制器下的系统控制指标为:幅值裕度 7.52 dB、相位裕度 50° 、灵敏度峰值 5.93 dB、闭环控制带宽 938 Hz (-3 dB)、调整时间 1.764 ms(超调量 $\leq \pm 5\%$)，后续工作将以该控制器参数作为基本参数开展控制实验调试。然而，本部分所开展的控制器设计并非最为优化的控制器参数，后续工作将通过实际的控制调试来获取最高的控制精度。

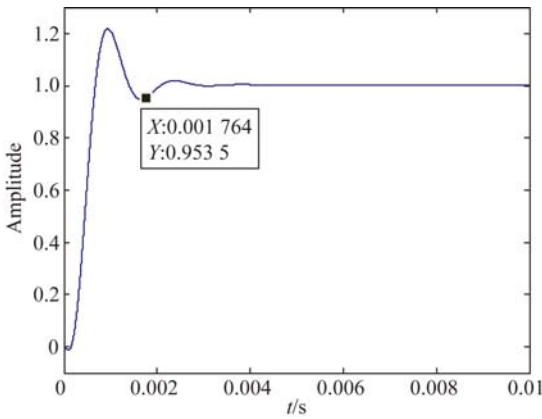


图 7 系统阶跃响应

Fig. 7 Step response of the system

4 实验与结果分析

4.1 时域控制结果

在常规实验室环境(未进行环境控制)下,开启光学平板隔振器,设置实验装置中的声光调制器 AOM1 和 AOM2 的频率均为 105 MHz,开环情况下连续采样 4 s,得到干涉图形的相位漂移值如图 8(a)所示。图 8(a)显示:在 4 s 的采样时间内,受外界扰动的影响,HRPMI 输出的干涉图形相位呈现随机漂移,4 s 内的最大漂移量接近 π rad,这将严重影响系统的曝光对比度。

相同实验环境下,将实验装置设为开环设置,开展了闭环控制实验。基于 3.2 节中的控制器设计结果进行控制实验,闭环 P(Proportional)控制 4 s,得到如图 8(b)(彩图见期刊电子版)中蓝线所示的闭环控制误差。蓝线显示:闭环 P 控制下,干涉图形相位保持稳定并且控制误差呈现纹波的形式,控制误差纹波的标准差 $\sigma = \pm 0.020 4$ rad。通常采用 3σ 值度量误差,故 P 控制下的控制误差为 $\pm 0.061 2$ rad (3σ)。

相同实验环境下,将实验装置设为开环设置,

采用 PID 控制器开展了更进一步的闭环控制实验。闭环 PID 控制 4 s,得到如图 8(b)红线所示的闭环控制误差。红线显示:PID 控制下的静态锁定控制误差纹波(红线)比 P 控制下的控制误差纹波(蓝色)更小,控制精度达到了 $\pm 0.046 1$ rad(3σ)。

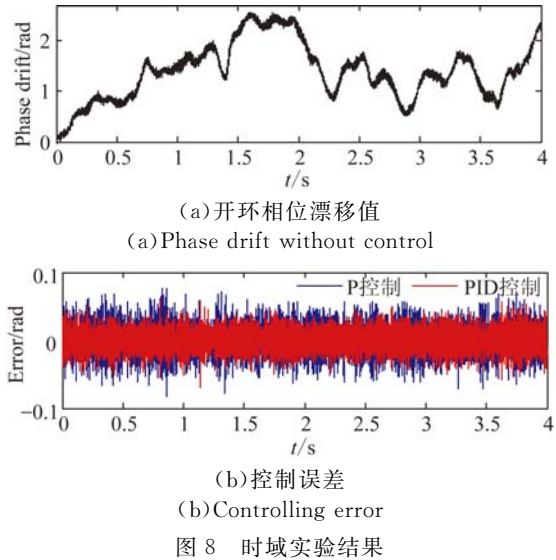


图 8 Experiment results in time domain

4.2 频域分析结果

为确定各个频率对相位漂移的影响,分别对图 8(a)和图 8(b)中闭环控制误差进行了频域分析,得到图 9(彩图见期刊电子版)的实验结果。其中(a)所示为开环相位漂移值和闭环相位控制误差的幅值谱密度(Amplitude Spectrum Density, ASD)。

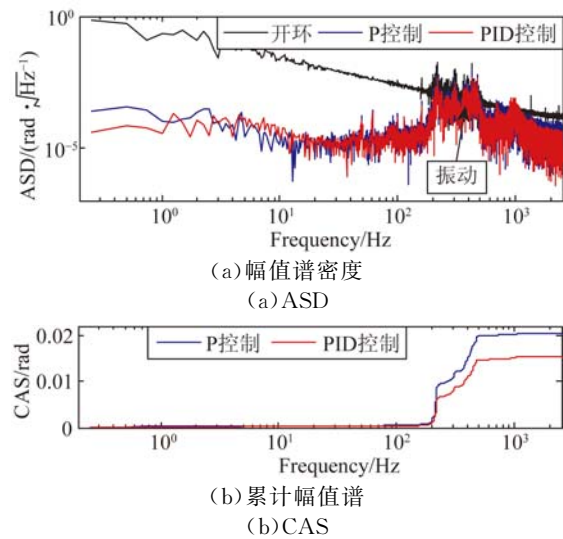


图 9 频域实验结果

Fig. 9 Experiment results in frequency domain

图9(a)黑线显示:开环时,干涉图形相位漂移基本呈现低频特性(<10 Hz,主要由环境扰动引起),同时在较高频段还叠加有一定的跨度频段很大的相位漂移(主要由振动引起)。图9(a)蓝线显示:闭环P控制后,干涉图形的低频相位漂移被极大抑制,但在193~500 Hz频段还存在一定的仅被部分抑制的相位漂移,故闭环控制误差纹波主要是由193~500 Hz频段的未被抑制的扰动引起。图9(a)显示:P控制和PID控制情况下,193 Hz以下的低频控制误差基本一致,而PID控制更进一步抑制了193~500 Hz频段的误差。因此,通过控制器参数的优化整定,高频相位漂移得到了进一步的抑制。

为更直观地评估各个频率对控制误差的贡献量,在图9(a)的幅值谱密度(红线和蓝线)基础上计算得到了如图9(b)所示的累积幅值谱(Cumulative Amplitude Spectral, CAS),累积幅值谱的物理意义是奈奎斯特频率所对应的值等于时域信号的标准差,曲线斜率越大表明信号在该频率点的能量越强。

图9(b)中的P控制和PID控制下的控制误差累积幅值谱显示:在奈奎斯特频率2 500 Hz处,对应的控制误差值为0.020 4 rad和0.015 37 rad,该值等于图8(b)中的控制误差的标准差值。累积幅值谱表明:无论是P控制还是PID控制,系统193 Hz以下的控制精度均达0.002 4 rad(3σ),且随频率增加呈现非常平缓的趋势,该控制精度约为系统的相位测量分辨率0.002 4 rad(3σ),这表明系统具有很好的低频扰动抑制特性。相对于P控制,采用更为优化的PID控制参数后,193~500 Hz频段扰动所引起的误差得到了更进一步的衰减(约降低了0.004 9 rad)。因此,优化控制器参数对高频振动所引起的误差具有一定的抑制效果,但是由于控制水床效应及频段跨度大而连续的微振动等因素的影响,PID控制器难以有效地

实现193~500 Hz频段误差的完全抑制。

控制结果频域分析及光学器件的振动测试结果表明:受限于隔振器性能,未被隔止的外界振动源传入系统,振动源频率接近于光学器件机械安装座的结构模态频率引起光学器件的微振动,进而引起干涉图形的相位漂移。受系统噪声、延迟、控制器参数等因素的影响,频段跨度大而连续的高频微振动引起的干涉图形相位漂移难以完全被PID控制器抑制从而以高频控制误差纹波形式呈现。

目前,系统相位锁定控制精度达到 $\pm 0.046 1$ rad (3σ),控制误差指标已非常接近MIT Nanoruler的控制精度水平且低频控制精度较大的优于MIT Nanoruler^[6]的结果。为实现控制精度的更进一步提高,后续工作将从两方面开展研究:一是研究新型的系统机械结构以提高系统的机械结构模态频率来降低高频微振动的影响,二是研究诸如前馈+PID反馈等更优控制算法。

5 结 论

本文针对零差移频式干涉图形相位锁定系统开展了系统精度控制研究。介绍了新型的零差移频式干涉图形锁定系统。在系统理论建模及模型辨识的基础上,针对非线性系统模型进行了高阶线性化拟合,并结合系统振动测试实验结果,设计了系统控制器。然后,基于控制器设计结果开展了系统实际控制调试,实现了系统的超精密控制。最后,针对系统控制误差纹波,采用频域分析方法揭示了影响系统控制精度的主要因素,提出了未来进一步提升系统控制精度的方法。实验结果表明:系统控制误差为 $\pm 0.046 1$ rad(3σ),控制误差主要以高频误差纹波形式呈现。文章还指出高频误差纹波是受系统噪声、延迟、控制器参数等因素限制,频段跨度大而连续的高频微振动引起的干涉图形相位漂移难以完全被控制器抑制而产生的。

参考文献:

- [1] BRITTEN J A, MOLANDER W A, KOMASHKO. A. M., *et al.*. Multilayer dielectric gratings for petawatt-class laser systems [J]. SPIE, 2004, 5273: 1-7.
- [2] CASTENMILLER T, VAN • DE • MAST F,

DE • KORT T, *et al.*. Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform [J]. SPIE, 2010, 7640: 76401N.

- [3] WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. A novel heterodyne planar grating encoder system for in-plane and out-of-plane displacement measurement with nanometer-resolution [C]. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the American Society for*

- Precision Engineering*, ASPE, 2014: 173-177.
- [4] DIXIT S N, BRITTEN J A, HYDE R A, *et al.*. Fabrication and applications of large-aperture diffractive optics [J]. *SPIE*, 2001, 4440: 101-108.
- [5] 巴音贺希格, 邵先秀, 崔继承, 等. 制作平面全息光栅的离轴抛物镜/洛埃镜干涉系统 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 56-63.
- BAYAN HESHIG, SHAO X X, CUI J C, *et al.*. Off-axis parabolic/Lloyd mirror interferometric systems for manufacturing plane holographic gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 56-63. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] SHI L, ZENG L J, LI L F. Fabrication of optical mosaic gratings with phase and attitude adjustments employing latent fringes and a red-wavelength dual-beam interferometer [J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21530-21543.
- [8] 赵博, 郝德阜. 用拼接法获取大面积衍射光栅 [J]. *光学精密工程*, 2000, 8(5): 503-507.
- ZHAO B, HAO D F. Manufacturing large-size grating by mosaic way [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5): 503-507. (in Chinese)
- [9] 李朝明, 吴建宏, 陈新荣, 等. 脉冲压缩光栅光学拼接方法研究 [J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1943-1946.
- LI C M, WU J H, CHEN X R, *et al.*. Research on the multi-exposure method to fabricate pulse compression mosaic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1943-1946. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 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 C 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)
- [12] 李森, 汪啸. 全息曝光条纹锁定研究与装置设计 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2012, 42(12): 1013-1018.
- LI B, WANG X. The fabrication of the locking device of interference fringes in holographic exposure [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2012, 42(12): 1013-1018. (in Chinese)
- [13] SCHATTEBURG M L, CHEN C, EVERETT P N, *et al.*. Sub-100 nm metrology using interferometrically produced fiducials [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1999, 17(6): 2692-2697.
- [14] 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, BAYAN HESHIG, 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)
- [15] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 扫描干涉光刻机相位锁定系统设计 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015, 55(7): 722-727.
- WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. Design of phase locking system for an interference lithography scanner [J]. *J. Tsinghua Univ (Sci & Tech)*, 2015, 55(7): 722-727. (in Chinese)
- [16] HEILMAN N 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.
- [17] ZHU Y, WANG L J, ZHANG M, *et al.*. Novel homodyne frequency-shifting interference pattern locking system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(6): 061201.
- [18] 宋莹. 全息光栅曝光系统干涉条纹静态及动态相位锁定技术研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2014.
- SONG Y. *Research on the Interference Fringe Static and Dynamic Phase-Locking Technology in the Lithography System of the Holographic Grating* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [19] 王显正, 莫锦秋, 王旭永. 控制理论基础 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2007.
- WANG X Z, MO J Q, WANG X Y. *Fundamental of Control Theory* [M]. 2nd. ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [20] VAN DE WAL M, VAN BAARS G, SPER-

LING F, *et al.*. Multivariable H^∞/μ feedback control design for high-precision wafer stage mo-

tion [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10 (7):739-755.

作者简介:



王磊杰(1988—),男,河南周口人,博士后,助理研究员,2010年于中国矿业大学(北京)获得学士学位,2016年于清华大学获得博士学位,主要从事基于扫描干涉光刻的大口径光栅制造技术、超精密光栅干涉仪位移测量技术和超精密激光干涉仪位移测量技术的研究。E-mail:wang-lj66@mail.tsinghua.edu.cn

导师简介:



朱煜(1965—),男,江苏兴化人,教授,博导,1983年于北京师范大学获学士学位,1993年、2001年于中国矿业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事面向 IC 制造装备的超精密机械系统设计、超精密测量、超精密运动控制等方面研究。E-mail:zhuyu@tsinghua.edu.cn



张鸣(1973—),男,吉林扶余人,副研究员,1996年于北京科技大学获得学士学位,1999年于中国运载火箭研究院 13 所获得硕士学位,2005年于清华大学获得博士学位,主要从事高端光刻机超精密工件台的研究,涉及超精密工件台系统设计以及结构设计、超精密制造工艺、高性能驱动、超精密测量及超精密环境保障等工件台研发的核心技术。E-mail:zm01@mails.tsinghua.edu.cn