

文章编号 1004-924X(2017)12-2975-11

超精密外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统

王磊杰, 张 鸣*, 朱 煜, 鲁 森, 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:开展了扫描干涉光刻机工作台超精密位移测量的实验研究,以提高扫描干涉光刻机的环境鲁棒性。针对扫描干涉光刻机工作台位移测量精度,提出了新型高环境鲁棒性外差利特罗式光栅干涉仪测量系统。介绍了系统测量原理,设计了测量系统,提出了基于 Elden 公式的系统死程误差建模方法。设计制造了尺寸仅为 $48\text{ mm}\times 48\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ 的光栅干涉仪。基于误差模型计算了死程误差,计算结果表明:对于 1.52 mm 死程的光栅干涉仪,宽松的环境波动指标(温度波动为 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$ 、压力梯度为 $\pm 7.5\text{ Pa}$ 、相对湿度波动为 $\pm 1.5\%$ 、 CO_2 含量波动为 $\pm 50\times 10^{-6}$)仅引起 $\pm 0.05\text{ nm}$ 的死程误差。最后,设计了基于商用双频激光平面镜干涉仪的测量比对系统,开展了光栅干涉仪原理验证实验和测并量稳定性实验。原理验证实验表明:光栅干涉仪原理正确且系统分辨率达 0.41 nm 。测量稳定性实验表明:常规实验室环境下,环境波动引起的死程误差为 7.59 nm (3σ) @ $<0.9\text{ Hz}$ & $1\sim 10\text{ Hz}$, 优于同等环境条件下平面镜干涉仪的 31.11 nm (3σ) @ $<0.9\text{ Hz}$ & $1\sim 10\text{ Hz}$ 。实验结果显示系统具有很高的环境鲁棒性。

关键词:扫描干涉光刻;位移测量;光栅干涉仪;外差干涉仪;环境鲁棒性

中图分类号: TH744.3; TH822 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.2975

A displacement measurement system for ultra-precision heterodyne Littrow grating interferometer

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

(State Key Laboratory of Tribology & Beijing Key Lab 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: The ultra-precision displacement measurement was researched for the work table of a Scanning Beam Interference Lithography (SBIL) tool to improve its environmental robustness. For the displacement measuring requirement of the work table of the SBIL tool, a novel heterodyne Littrow Grating Interferometer (GI) displacement measurement system with high environmental robustness was proposed. The measuring principle of the heterodyne Littrow grating interferometer was introduced, and the design of the system and dead path error modeling method based on Elden equation was performed. An integrated mini grating interferometer with a size of $48\text{ mm}\times 48\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ was fab-

收稿日期:2017-05-16;修订日期:2017-08-10.

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)

ricated. Then, the dead path error of the system was calculated based on the model. The calculation result indicates that the dead path error caused by a relative large environmental fluctuation (temperature fluctuation in $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, pressure fluctuation in $\pm 7.5\text{ Pa}$, humidity fluctuation in $\pm 1.5\%$, and CO_2 content fluctuation in $\pm 50 \times 10^{-6}$) is only $\pm 0.05\text{ nm}$. Finally, a comparison system based on the commercial plane mirror interferometer (PMI) and GI was designed for the principle verification and measurement stability experiment. The principle verification demonstrates that the principle of the system is right and the resolution reaches to 0.41 nm . The measurement stability experiment shows that the dead path error of GI and PMI caused by the environmental fluctuation are respectively 7.59 nm (3σ) @ $<0.9\text{ Hz}$ & $1\sim 10\text{ Hz}$ and 31.11 nm (3σ) @ $<0.9\text{ Hz}$ & $1\sim 10\text{ Hz}$ in a conventional laboratory environment, which indicates the environmental robustness of the GI is higher than that of the PMI.

Key words: scanning beam interference lithography; displacement measurement; grating interferometer; heterodyne interferometer; environmental robustness

1 引 言

作为惯性约束核聚变激光驱动装置脉冲压缩器^[1]以及 193ArF 浸没式步进扫描光刻机^[2-4]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,扫描干涉光刻技术^[5-6]是制造这类光栅的主要技术之一。扫描干涉光刻机是麻省理工学院基于扫描干涉光刻技术研制的用于制造大口径高精度全息平面光栅的专用设备^[5],具备尺寸达 $910\text{ mm} \times 420\text{ mm}$ 、精度达 $1\ 740\text{ line/mm} \pm 50 \times 10^{-6}$ ^[7]的脉冲压缩光栅以及大口径高精度二维全息平面光栅的制造能力。

扫描干涉光刻机^[5]主要由干涉曝光系统、干涉图形相位锁定系统、超精密工作台及其激光干涉仪位移测量系统、光束位姿自动准直系统、光束位姿锁定系统、波前测量系统、周期测量系统、隔振系统和环境控制系统等构成。基于双频激光干涉仪位移测量的工作台测控系统是扫描干涉光刻机最为核心的部分之一,其精度直接决定着机器的扫描曝光质量。双频激光干涉仪的测量基准是激光波长,非真空环境中,测量基准——波长随诸如温度、压力梯度等环境因素的波动而变化,这将影响激光干涉仪的测量精度,从而导致扫描干涉光刻机的扫描曝光质量下降。在极为严苛的环境控制指标下(温度波动: $\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力梯度波动: $\pm 2.6\text{ Pa}$,相对湿度波动: $\pm 0.8\%$, CO_2 含量波动: $\pm 48 \times 10^{-6}$),扫描干涉光刻机的双频激光干涉仪测量系统在 300 mm 的测量行程内仅由低

频环境波动引起的随机位移测量误差达 4.8 nm ^[5]。随着光栅制造尺寸向米级甚至更大尺寸扩展,在上述环境指标下,仅环境波动引起的激光干涉仪随机测量误差将达十几纳米量级,这将严重影响光栅的制造精度。此外,由于扫描干涉光刻机中存在工作台电机、声光调制器、双频激光器等诸多热源,在长达米级的行程内实现严苛环境控制指标是极具挑战的。因此,双频激光干涉仪的高环境敏感性是扫描干涉光刻机制造米级高精度光栅的主要瓶颈。

针对此问题,近年来,以光栅节距为测量基准的高环境鲁棒性光栅干涉仪位移测量技术成为超精密位移测量领域的研究热点^[2-4]。在同等的环境控制指标下,光栅干涉仪凭借非常短的光程实现了比激光干涉仪更高的测量稳定性。区别于传统的莫尔条纹光栅尺,光栅干涉仪是基于光栅多普勒效应和光学干涉原理实现位移测量的,具有很高的分辨率(亚纳米甚至几十皮米)和精度^[8]。目前,该技术已在几百毫米的测量范围内实现了亚纳米测量稳定性^[2-3],这为提高现有扫描干涉光刻机的环境鲁棒性提供了潜在的技术路径。

本文针对扫描干涉光刻机工作台的位移测量需求,提出了新型的外差利特罗式光栅干涉仪测量方案,以实现高环境鲁棒性扫描干涉光刻机。基于该方案原理开展了系统设计、死程误差建模和环境鲁棒性分析研究。最后,设计了基于双频激光平面镜干涉仪的测量比对系统,开展了光栅干涉仪原理验证实验和测量稳定性实验,以验证原理方案和评估系统环境的鲁棒性。

2 高环境鲁棒性扫描干涉光刻机方案

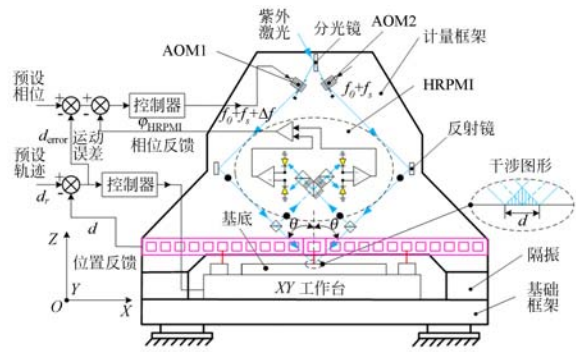
图 1 所示为新型高环境鲁棒性扫描干涉光刻机方案^[9]。扫描干涉光刻机主要包括新型的干涉曝光及零差移频式相位锁定系统^[10-11]、XY 工作台及其位置测量反馈系统、计量框架、隔振器和基础框架。

一束垂直偏振(s-polarization)的紫外激光经分光镜分光后,分别入射至 AOM1 和 AOM2 后产生衍射,两正一级衍射光分别经反射镜以相同的角度入射至基底平面并形成干涉图形。在靠近基底处放置两个分光镜来提取少量光,这些光入射至零差冗余相位测量干涉仪(Homodyne Redundant Phase Measurement Interferometer, HRPMI)^[10-11]用于干涉图形相位漂移的测量。HRPMI 反馈测量值至系统移相锁定控制器。

XY 工作台根据图 1(b)中所示的动栅式位移测量子系统的位移测量反馈值进行精密运动控制,然后输出运动误差至系统移相锁定控制器。根据图 1(b)中所示的工作台动栅式位移测量原理方案,方案中:沿工作台四边布置四块窄长状光栅尺(光栅矢量方向平行于长边,材质为零膨胀微晶玻璃),光栅尺的上方对应布置四组干涉仪阵列,光栅尺和干涉仪之间的距离约几毫米。光栅尺和对应的干涉仪已经过高精度离线标定。 X_1 和 X_2 光栅尺配合对应的干涉仪阵列,用于测量工作台 X 方向的位移和偏航转角 θ_z ; Y_1 和 Y_2 光栅尺配合对应的干涉仪阵列,用于测量工作台 Y 方向的位移。四组干涉仪阵列中间为干涉图形。工作台相对于干涉图形在 XOY 面内做步进扫描曝光时,通过同组干涉仪之间的接力实现工作台的长行程位移测量。

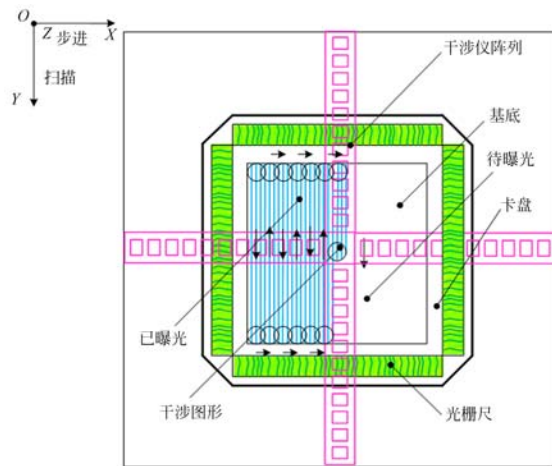
系统移相锁定控制器根据 HRPMI 的测量值和工作台的运动误差反馈值控制声光调制器 AOM1 连续移频进行干涉图形的相位调节,从而实现干涉图形相位漂移的抑制和工作台运动误差的补偿,最终实现大面积高精度曝光拼接。

新型扫描干涉光刻机的工作台测量方案中,由环境波动引起的测量误差主要来自两方面:一是由温度波动引起长光栅尺的热膨胀而导致的漂移误差,二是由环境波动引起的折射率波动而导致的死程误差。目前,肖特公司提供的特级微



(a) 正视图

(a) Front view



(b) 俯视图

(b) Vertical view

图 1 高环境鲁棒性扫描干涉光刻机方案

Fig. 1 Scheme of novel SBIL tool with high environmental robustness

晶玻璃材料的热膨胀系数达 $0.007 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,对于采用该材料作为基底的长达 1 m 的光栅尺,温度波动为 $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$,热漂移误差仅为 $\pm 0.07 \text{ nm}$ 。光栅尺和干涉仪之间的光程非常短(5.6 mm),环境波动引起的光栅干涉仪死程误差在较为宽松的环境控制指标下($\Delta t = \pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\Delta p = \pm 7.5 \text{ Pa}$ 、 $\Delta RH = \pm 1.5 \%$ 、 $\Delta x = \pm 50 \times 10^{-6}$)可抑制至 $\pm 0.05 \text{ nm}$ 。因此,测量方案可在较为宽松的环境控制指标下实现很高的环境鲁棒性。

此外,扫描干涉光刻机整体布置于隔振地基上,计量框架通过隔振器安装至基础框架上形成稳定的系统基准,XY 工作台放置于基础框架上,机器的各类光学器件和干涉仪阵列固结于计量框架上。对比 MIT Nanoruler^[5]的工作台,即各类

光学器件和计量传感器均固定于大理石基座的方案,光学器件与工作台独立隔振的系统布置方案能够有效地避免工作台工作过程中产生的反作用力扰动光学器件,从而使各类光学器件和计量传感器保持很高的稳定水平。

3 光栅干涉仪位移测量系统设计

3.1 测量需求

工作台动栅式位移测量方案中,光栅干涉仪以阵列的形式固定于阵列架上,长条状的平面光栅固定于工作台卡盘上,阵列中的光栅干涉仪通过切换实现大行程位移测量。高精度是光栅干涉仪的核心需求,亚纳米级甚至更高的测量分辨率是实现纳米测量精度的前提,这要求光栅干涉仪具有很高的测量分辨率和精度。阵列方案中光栅干涉仪个数较多,而高稳频精度的激光光源功率通常较低,这要求光栅干涉仪具有较高的激光利用率。此外,对于长条平面光栅来说,其宽度越大制造难度越大,且需要设计更大的工作台卡盘来安装光栅。为了在窄长的光栅面上同时布置两个光栅干涉仪以实现切换,需要光栅干涉仪尺寸小且结构紧凑。

良好的测量信号是光栅干涉仪实现高精度测量的前提,实际使用时,工作台的运动偏差将造成光栅干涉仪的测量信号强度降低甚至丢失。为实现基于动栅式位移测量方案的高精度位移测量,光栅干涉仪需要在工作台的运动偏差范围内保持良好的信号强度。扫描干涉光刻工作台的偏航、翻滚、俯仰运动误差要求控制在 $\pm 1 \mu\text{rad}$ 的范围内^[5]。考虑到一定的运动偏差裕量,光栅干涉仪要在 $\pm 50 \mu\text{rad}$ 范围内保持较好的信号强度。

光栅干涉仪位移测量系统的作用是实时反馈输出工作台的轨迹误差至相位锁定系统。为实现数据的无缝对接,光栅干涉仪位移测量系统的数据采集硬件架构要与相位锁定系统的硬件架构兼容。相位锁定系统采用基于 VME (Versa Module Eurocard) 总线的硬件架构^[10-11],故光栅干涉仪位移测量系统的数据采集硬件架构应基于 VME 总线实现。

目前,针对一维光栅干涉仪位移测量技术^[12-22]的研究主要集中于光栅干涉仪光路方案、干涉仪精度、干涉仪运动允差以及小型化等方面。

诸多研究人员已经设计制造出一维光栅干涉仪位移测量系统,部分系统虽已实现了高达亚纳米的测量分辨率、毫弧度级转角允差等性能,然而这些测量系统难以满足扫描干涉光刻机工作台的测量需求。因此,需要在相关研究文献研究的基础上,针对扫描干涉光刻机工作台的相关需求设计专门的光栅干涉仪位移测量系统。

3.2 方案设计与系统原理

光栅干涉仪位移测量系统方案采用外差探测方案,采用该方案出于三方面的原因:一是外差测量系统的测量信号是拍频信号,抗干扰能力强、易于实现高测量精度;二是外差测量系统仅需一路测量信号进行细分、求解和判向,系统更为简洁、结构更为紧凑,易于实现小型化;三是考虑到未来光栅干涉仪位移测量系统需要适配基于 VME 控制总线的相位锁定系统,而现有的基于 VME 控制总线的商业高精度、高细分率测量板卡均为外差测量板卡,故选择外差方案作为系统探测方案。

光栅干涉仪位移测量系统采用对称的利特罗光路方案,利特罗光路方案具有三方面的优势:一是利特罗光路方案的光栅干涉仪具有较高的激光利用率;二是利特罗光路方案的光栅干涉仪具有较大的运动允差;三是利特罗光路方案的死程误差小且光路简洁。

基于以上方案设计,提出了如图 2 所示的外

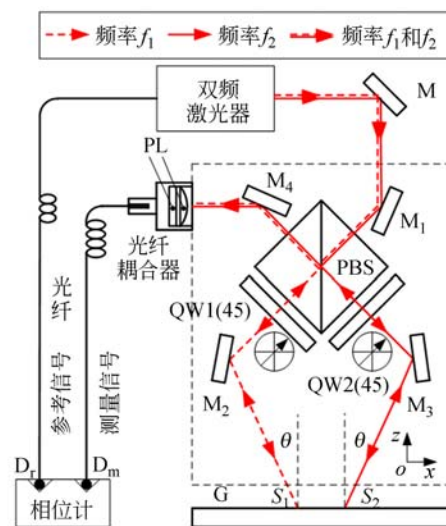


图 2 外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统原理图
Fig. 2 Principle diagram of heterodyne Littrow grating interferometer displacement measurement system

差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统。外差光栅干涉仪位移测量系统包括双频激光器、光栅(光栅节距为 p)、光栅干涉仪及相位计(内置光电探测器)。光栅干涉仪包含偏振分光镜(Polarized Beam Splitter, PBS)、1/4 波片(Quarter Waveplate, QW)、反射镜(M)、光纤耦合器(内置透镜(L)和偏振片(P))等器件。

双频激光器出射的双频正交偏振激光(频率为 f_1 的水平偏振光(p -polarized)和频率为 f_2 的垂直偏振光(s -polarized))经 M_1 后入射至光栅干涉仪中,双频正交偏振激光经 PBS 后, p 偏振光透射, s 偏振光反射。 p 偏振光透射后经 QW1(45)后变为左旋偏振光,左旋偏振光经 M_2 后以利特罗角入射至光栅(入射点 S_1),入射光在光栅处发生衍射,负一级衍射光沿原光路返回,再次经过 QW1(45)后变为 s 偏振光, s 偏振光返回至 PBS 后发生反射,再经 M_4 入射至光纤耦合器。频率 f_2 的 s 偏振光透射后经 QW2(45)后变为右旋偏振光,右旋偏振光经 M_3 后以利特罗角入射至光栅(入射点 S_2),入射光在光栅处发生衍射,正一级衍射光沿原光路返回,再次经过 QW2(45)后变为 p 偏振光, p 偏振光返回至 PBS 后发生透射,经 M_4 入射至光纤耦合器。两束测量光以重合入射的方式入射至光纤耦合器(内置透镜和偏振片),形成光学拍频测量信号并经光纤传输至相位计;双频激光器同时输出参考信号至外差相位计。当光栅沿光栅矢量方向运动时,外差相位计利用参考信号和测量信号读出光栅运动位移信息。

由图 2 可知,两束测量光束分别在不同位置以利特罗条件入射至光栅,则两束测量光束相对于法线的入射角(利特罗角)为:

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda}{2p}, \quad (1)$$

式中: λ 为 He-Ne 激光在空气中的波长, p 为光栅节距。

当光栅沿光栅矢量方向运动 Δx 位移时,根据光栅多普勒效应可知, S_1 处的正一级衍射光和 S_2 处的负一级衍射光的相位变化分别为:

$$\begin{aligned} \Phi_{+1} &= \frac{2\pi}{p} \Delta x \\ \Phi_{-1} &= -\frac{2\pi}{p} \Delta x \end{aligned} \quad (2)$$

S_1 处的正一级衍射光和 S_2 处的负一级衍射

光经干涉仪后形成拍频测量信号。针对图 2 中外差光栅干涉仪的光路,利用偏振琼斯矩阵来描述外差光栅干涉仪形成拍频测量信号的原理。

激光器出射的正交偏振双频激光的光矢量为:

$$\mathbf{E} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp i(-2\pi f_1 t + \varphi_0) \\ \exp i(-2\pi f_2 t + \varphi_0) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: E_0 为双频激光的电场矢量振幅, φ_0 为初相, f_1, f_2 为双频激光的两个频率。

图 2 中的干涉仪光路显示,双频激光入射至干涉仪后形成两束测量光,分别称为①号测量光和②号测量光。①号测量光的光路为: $E \rightarrow M_1 \rightarrow \text{PBS}(T) \rightarrow \text{QW1}(45) \rightarrow M_2 \rightarrow G(S_1) \rightarrow M_2 \rightarrow \text{QW1}(45) \rightarrow \text{PBS}(R) \rightarrow M_4 \rightarrow L \rightarrow P(45) \rightarrow E_1$,则经光纤耦合器后①号测量光的光矢量为:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{J}_{P(45)} \mathbf{J}_{M_4} \mathbf{J}_{PBR} \mathbf{J}_{QW(45)} \mathbf{J}_{M_2} \mathbf{J}_{G(S_1)} \mathbf{J}_{M_2} \cdot \mathbf{J}_{QW(45)} \mathbf{J}_{PBT} \mathbf{J}_{M_1} \mathbf{E}. \quad (4)$$

②号测量光的光路为: $E \rightarrow M_1 \rightarrow \text{PBS}(R) \rightarrow \text{QW2}(45) \rightarrow M_3 \rightarrow G(S_2) \rightarrow M_3 \rightarrow \text{QW2}(45) \rightarrow \text{PBS}(T) \rightarrow M_4 \rightarrow L \rightarrow P(45) \rightarrow E_2$,则经光纤耦合器后②号测量光的光矢量为:

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{J}_{P(45)} \mathbf{J}_{M_4} \mathbf{J}_{PBT} \mathbf{J}_{QW(45)} \mathbf{J}_{M_3} \mathbf{J}_{G(S_2)} \cdot \mathbf{J}_{M_3} \mathbf{J}_{QW(45)} \mathbf{J}_{PBR} \mathbf{J}_{M_1} \mathbf{E}, \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, \mathbf{J} 代表光学器件的琼斯矩阵,光学器件的琼斯矩阵如表 1 所示。

表 1 光学器件的琼斯矩阵

Tab. 1 Jones matrices of optics

| 光学器件 | 琼斯矩阵 |
|----------|--|
| 偏振器 | $\mathbf{J}_{P(45)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, 光轴呈 45° 布置 |
| 光栅 | $\mathbf{J}_G = \begin{bmatrix} \sqrt{\eta_p} & 0 \\ 0 & \sqrt{\eta_s} \end{bmatrix} e^{i\Phi_d}$, η_p 和 η_s 分别为光栅对 p 和 s 光的一级衍射效率, Φ 为多普勒相移 |
| 1/4 波片 | $\mathbf{J}_{QW(45)} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1+i & 1-i \\ 1-i & 1+i \end{bmatrix}$, 快轴呈 45° 布置 |
| 反射镜 | $\mathbf{J}_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| 偏振分光镜透射: | $\mathbf{J}_{PBT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 反射: $\mathbf{J}_{PBR} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ |

根据式(4)和式(5)可知,①号测量光和②号测量光叠加形成的拍频信号光强为:

$$I_m = (E_1 + E_2)(\overline{E_1 + E_2}) = I_0 + I_0 \cos(2\pi\Delta f t + \Phi_d), \quad (6)$$

式中: $\Delta f = f_2 - f_1$ 为双频激光的频差, I_0 为光强幅值, 其表达式为:

$$I_0 = \frac{(\sqrt{\eta_p} + \sqrt{\eta_k})^2}{8} E_0^2, \quad (7)$$

Φ_d 为光栅运动引起的相位变化量, 其表达式为:

$$\Phi_d = \Phi_{+1} - \Phi_{-1} = \frac{4\pi}{p} \Delta x. \quad (8)$$

拍频信号经光纤传导至外差相位计, 外差相位计提取拍频信号的交流部分进行相位求解后读出光栅运动引起的相位变化量 Φ_d 。文献中详细介绍了外差相位计的工作原理^[23]。

当光栅移动 Δx 时, 外差相位计的读数为:

$$\Phi = k \frac{2\pi}{N} \Delta x = \Phi_d, \quad (9)$$

式中: N 为外差相位计的电子细分倍数, k 为外差相位计的读数。外差相位计的读数即为光栅多普勒效应所带来的相位变化, 联立式(8)和式(9)可知光栅的位移为:

$$\Delta x = k \frac{p}{2N} \Delta \Phi = k \cdot x_{res}, \quad (10)$$

式中: 光栅节距 p 和外差相位计的电子细分倍数 N 均为已知量。根据外差相位计的读数 k , 即可以得到光栅的运动位移。

3.3 死程误差建模

根据图 2 可知, 干涉仪的两测量光束不共光路, 且实际制造误差将导致两测量光束不完全对称从而产生光程差(死程), 环境波动时光程差将导致死程误差。当干涉仪两测量光束不对称时, 式(6)的拍频信号可表示为:

$$I_m = (E_1 + E_2)(\overline{E_1 + E_2}) = I_0 + I_0 \cos\left[2\pi\Delta f t + \Phi_d + \frac{2\pi(L_1 - L_2)}{\lambda}\right], \quad (11)$$

式中 L_1, L_2 分别为①号测量光和②号测量光的非共光路段几何光程(理想情况下光路对称设计

$$\begin{cases} (n-1)_s \times 10^8 = 8342.54 + \frac{2406147}{130 - \sigma^2} + \frac{15998}{38.9 - \sigma^2} (n-1)_x = [1 + 0.540(x - 0.0003)](n-1)_s \\ (n-1)_{ip} = \frac{p(n-1)_x + 10^{-8}(0.601 - 0.00972t)p}{96095.43 + 1 + 0.0036610t} n_{ipf} - n_{ip} = -f \times (3.7345 - 0.0401\sigma^2) \times 10^{-10} \end{cases}, \quad (17)$$

式中: σ 为光在真空中的波数, n_s 为标准干燥空气下的标准折射率, n_{ip} 为标准干燥空气在温度为 t 、压强为 p 时的折射率, n_{ipf} 为标准湿空气在水压 f

$L_1 = L_2$)。根据式(11)可知, 当激光波长波动时, 拍频光强信号的相位将额外增加相位值, 这将引起测量误差, 即死程误差。额外增加的相位值表达式为:

$$\varphi_{error} = \frac{2\pi(L_1 - L_2)}{\lambda} - \frac{2\pi(L_1 - L_2)}{(\lambda + \Delta\lambda)} = \frac{2\pi(L_1 - L_2)\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)}, \quad (12)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为激光波长的波动量。额外增加的相位值被误认为是光栅多普勒效应引起的, 故额外增加的相位值与位移测量误差之间存在:

$$\varphi_{error} = 4\pi \frac{x_{error}}{p}. \quad (13)$$

根据式(12)和式(13)可知, 位移测量误差为:

$$x_{error} = \frac{p(L_1 - L_2)\Delta\lambda}{2\lambda(\lambda + \Delta\lambda)}. \quad (14)$$

当空气折射率波动时, 激光空气中波长将产生波动, 空气中的波长与真空中的波长的关系为: $\lambda = \lambda_v / n$ 。因此, 波长波动量与空气折射率波动量之间的关系为:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{\lambda_v}{n + \Delta n} - \frac{\lambda_v}{n} = -\frac{\Delta n \lambda_v}{n + \Delta n}, \quad (15)$$

式中 Δn 为空气折射率波动量。将式(15)带入式(14)可得由空气折射率波动引起的测量误差为:

$$x_{error-i} = -\frac{p(L_1 - L_2)\Delta n}{2\lambda_v}. \quad (16)$$

根据式(16)可知, 死程误差主要由空气折射率波动量和死程长度决定, 因此, 根据环境波动参数得出空气折射率波动量是计算死程误差的关键。基于 Birch K. P. 和 Downs M. J. 最后修正后的 Edlen 公式^[24-25]和水汽压与相对湿度的关系公式^[26], 推导了空气折射率波动与环境参数波动之间的关系以及敏感性参数的求取方法。

Birch K. P. 和 Downs M. J. 最后修正后的 Edlen 公式^[24-25]为:

时的折射率, n_x 为标准干燥空气在 CO_2 含量为 x 时的折射率。

相对湿度是表示空气中水汽含量的常用参

数,水汽压与相对湿度之间的关系^[26]为:

$$f = rh \cdot \exp \left[\begin{array}{l} A \cdot (t+273.15)^2 + \dots \\ B \cdot (t+273.15) + \dots \\ C + D/(t+273.15) \end{array} \right], \quad (18)$$

式中: $A=1.237\ 8847 \times 10^{-5}$, $B=-1.912\ 131\ 6 \times 10^{-2}$, $C=33.937\ 110\ 47$, $D=-6.343\ 164\ 5 \times 10^3$ 。

各项环境参数的标准值为:温度 $T=20\ ^\circ\text{C}$, 压强 $P=1.02 \times 10^5\ \text{Pa}$, 相对湿度 $RH=40\%$, 二氧化碳含量 $X=365 \times 10^{-6}$ 。根据式(17)和式(18)可以得到空气折射率变化量与温度、压强、相对湿度、二氧化碳含量变化量的关系为:

$$\Delta n = \frac{\partial n}{\partial t} \Big|_{\substack{t=T \\ p=P \\ rh=RH \\ x=X}} \Delta t + \frac{\partial n}{\partial p} \Big|_{\substack{t=T \\ p=P \\ rh=RH \\ x=X}} \Delta p + \dots + \frac{\partial n}{\partial rh} \Big|_{\substack{t=T \\ p=P \\ rh=RH \\ x=X}} \Delta rh + \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_{\substack{t=T \\ p=P \\ rh=RH \\ x=X}} \Delta x, \quad (19)$$

式中: $\partial n/\partial t$ 为温度敏感性参数, $\partial n/\partial p$ 为压强敏感性参数, $\partial n/\partial rh$ 为相对湿度敏感性参数, $\partial n/\partial x$ 为 CO_2 含量敏感性参数。为获取良好的干涉信号,干涉仪光源通常采用 He-Ne 激光,其真空波长为 $632.991\ 528\ \text{nm}$,根据式(19)计算得到的环境敏感性参数见表 2。

表 2 空气折射率和折射率环境敏感性参数

Tab. 2 Refraction index and environmental sensitivity parameters

| 环境敏感性参数 | He-Ne |
|--|------------------------|
| 标准空气折射率(NA) | 1.000 273 |
| 真空波长/nm | 632.991 528 |
| 空气波长/nm | 632.818 663 |
| 温度敏感性($\partial n/\partial t$)/ $^\circ\text{C}^{-1}$ | -9.36×10^{-7} |
| 压强敏感性($\partial n/\partial p$)/ Pa^{-1} | 2.68×10^{-9} |
| 相对湿度敏感性($\partial n/\partial \%RH$)/ $(\%RH)^{-1}$ | -8.50×10^{-7} |
| CO_2 含量敏感性($\partial n/\partial x$)/ $\times 10^{-6}$ | 0.000 148 |

取较为宽松的环境参数波动范围: $\Delta t = \pm 0.01\ ^\circ\text{C}$ 、 $\Delta p = \pm 7.5\ \text{Pa}$ 、 $\Delta RH = \pm 1.5\%$ 、 $\Delta x = \pm 50 \times 10^{-6}$ 。根据式(19)和表 2 可知,空气折射率波动量为 $\Delta n_r = \pm 50.95 \times 10^{-12}$,若两测量光路的光程差为 $1.52\ \text{mm}$,则空气折射率波动引起的测量误差为 $\pm 0.05\ \text{nm}$ 。

环境参数通常是在一定范围内随机低频动态波动的,故死程误差随着环境参数随机低频动态波动。本部分仅基于公式利用环境参数波动的上下限值计算了折射率波动的上下限值及死程误差

的上下限值,本部分公式还可以根据环境参数动态波动曲线计算死程误差的动态波动情况。

3.4 系统设计

外差光栅干涉仪位移测量系统主要包括双频激光器、光栅干涉仪、光栅、光纤和外差相位计。除光栅干涉仪外,其余部件均选用现有商用器件。

商用双频激光器、光纤和外差相位计主要由 Agilent 和 Zygo 两家公司提供,Zygo 的双频激光器具有功率大、稳频精度高、频差大等优点。ZMI 4104C 具有 4 个测量通道,分辨率高达 $2\pi/1024$ 。ZMI 4104C 仅需 $70\ \text{nW}$ 的光功率即可正常工作,这极大地降低了系统对激光功率的需求。此外,ZMI 4104C 直接将光电探测器集成至外差相位计内部,构造简单。双频激光器选择 Zygo 公司的 ZMI 7702,该双频激光器出射的双频激光功率大于 $400\ \mu\text{W}$,真空波长为 $632.991\ 528\ \text{nm}$,光斑尺寸可选择 $3\ \text{mm}$ 或 $6\ \text{mm}$ 。

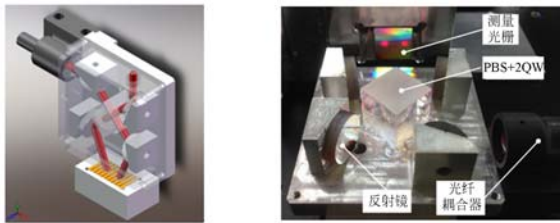
考虑到亚纳米甚至更高的系统分辨率、利特罗角度以及全息平面光栅的槽线系列,一维平面全息光栅的槽线参数为 $1\ 200\ \text{line/mm}$ (节距为 $833.3\ \text{nm}$)。将激光波长 $\lambda=632.8\ \text{nm}$ (标准环境下折射率为 $1.000\ 272$)和光栅节距 $p=833.3\ \text{nm}$ 带入至式(1),得到利特罗入射角 $\theta=22.328\ ^\circ$ 。一维平面光栅的节距为 $833.3\ \text{nm}$,外差电子卡的分辨率为 $1\ 024$,根据式(10)可知,外差光栅干涉仪位移测量系统的分辨率约为 $0.41\ \text{nm}$ 。

光栅干涉仪的光斑尺寸选择 $3\ \text{mm}$ 以保证干涉仪尺寸最小。为确保激光光束能够完全处于光学器件的通光孔径中,光栅干涉仪的反射镜和偏振分光镜尺寸均选择 $12.5\ \text{mm}$,两片 $1/4$ 波片分别以一定精度指标粘接至偏振分光镜的两个侧面上。为确保测量光路的对称性,光栅干涉仪的所有光学器件均以一定精度指标粘接于高精度一体加工成型的机械基座上。图 3 所示为光栅干涉仪的设计制造结果,光栅干涉仪的尺寸为 $48\ \text{mm} \times 48\ \text{mm} \times 18\ \text{mm}$ 。

3.5 测量比对系统实验装置

本文主要开展的光栅干涉仪实验验证和分析有两方面:(1)外差光栅干涉仪位移测量系统原理验证;(2)系统死程误差及环境鲁棒性测试。根据所需开展的实验,构建出如图 4 所示的测量比对系统实验装置,实验装置光路已在图中用白线标出。

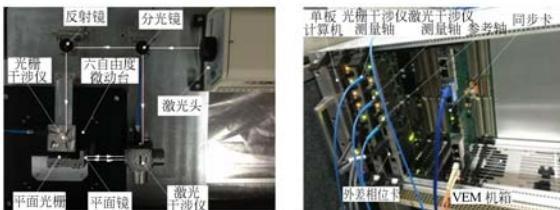
系统主要包括双频激光器、外差光栅干涉仪、



(a) 3D 设计模型 (b) 制造结果
(a) 3D design model (b) Fabrication result

图 3 光栅干涉仪的设计制造结果

Fig. 3 Design and fabrication result of grating interferometer



(a) 光学部件和机械结构 (b) 数据采集硬件
(a) Optics and mechanics (b) Data acquisition hardware

图 4 测量比对系统实验装置

Fig. 4 Experiment setup of comparison system

一维平面光栅、平面镜干涉仪 (PMI)、平面镜、PI 六自由度微动台和数据采集部件。其中,六自由度微动台用于提供精密运动,平面镜干涉仪用于提供测量比对数据。数据采集部件用于采集外差光栅干涉仪和平面镜干涉仪的测量数据。考虑到未来工作台的外差光栅干涉仪位移测量系统数据需要实时传输至相位锁定系统(控制硬件架构是基于 VME 控制总线实现的),故外差平面干涉仪的数据采集部件基于 VME 控制总线实现。数据采集部件主要包括 VME 机箱、MVME 6100 单板计算机、外差相位计和上位机,PowerPC 和外差相位计均安装于 VME 机箱背板上,外差相位计采用 Zygo ZMI 4104C 四轴卡。基于上述数据采集硬件,系统可实现 5 kHz 的采样频率。图 4(b)所示的数据采集部件的硬件和软件部分均和相位锁定系统的控制硬件和软件兼容。

4 实验与结果分析

4.1 原理验证实验

利用测量比对系统实验装置开展外差光栅干涉仪位移测量系统验证实验。控制微动台沿光栅

干涉仪和激光干涉仪测量方向(x 方向)做连续往复正弦运动,正弦运动的幅值约为 100 nm、频率为 1 Hz,光栅干涉仪和激光干涉仪同时计数,得到如图 5 所示的测量结果。测量比对结果显示,外差光栅干涉仪位移测量系统和双频激光干涉仪位移测量系统的测量结果基本吻合,由此验证了外差光栅干涉仪测量系统原理的正确性。

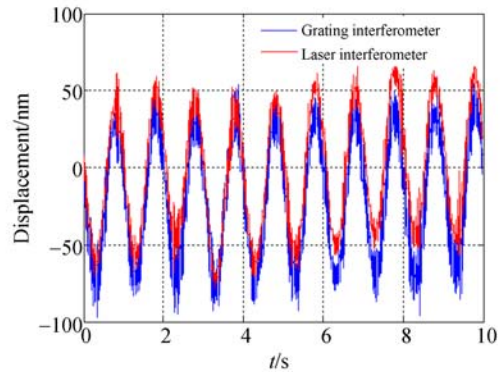


图 5 比对测量结果

Fig. 5 Result of comparative measurement

4.2 短期测量稳定性实验

据本文 3.3 节可知,光栅干涉仪周围的环境参数波动将引起死程误差。目前,由于尚未营造出 $\Delta t = \pm 0.01$ °C、 $\Delta p = \pm 7.5$ Pa、 $\Delta RH = \pm 1.5\%$ 、 $\Delta x = \pm 50 \times 10^{-6}$ 的环境控制系统,仅在常规实验室环境下开展外差光栅干涉仪位移测量系统的短期测量稳定性实验,以初步定量评估环境波动导致的动态死程误差。同时开展平面镜干涉仪的短期测量稳定性对比实验。为得到低频环境波动对动态位移测量值的影响,实验过程中控制微动台沿 x 方向以频率为 1 Hz、幅值为 10 nm 的正弦曲线运动。在常规实验室环境下,平面镜干涉仪 (Planar Mirror Interferometer, PMI) 和光栅干涉仪 (Grating Interferometer, GI) 同时进行计数,采样频率为 5 kHz,采集时间为 10 s,得到 PMI 和 GI 的原始时域测量结果,测量结果的移动平均 (Moving Average, MA) 如图 6 所示。

如图 6 所示:10 s 测量时间内,PMI 的测量结果波动剧烈;测量纹波的 MA 曲线存在较大低频漂移且同时呈现不太规则的频率约为 1 Hz 的正弦波型,局部少许正弦波形的峰谷值约为 10 nm。相比 PMI,GI 的测量结果较为稳定,测量纹波的 MA 曲线呈现较为规则的频率约为 1 Hz 的正弦波形,正弦波形的峰谷值约为 10 nm。

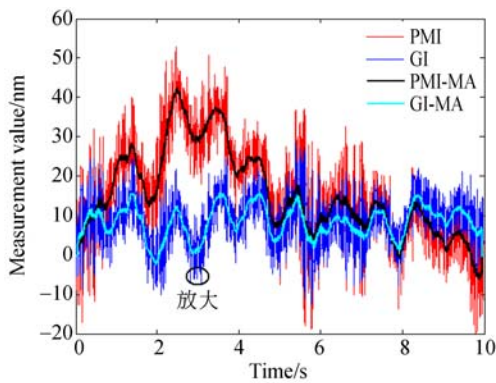


图 6 时域测量结果

Fig. 6 Time domain measurement result

随机选取图 6 中 10 s 内光栅干涉仪的原始时域测量结果进行放大,得到如图 7 所示的局部放大图。图 7 显示:两采样数据点间的最小增量为 0.41 nm,这表明系统的测量分辨率达 0.41 nm,与计算结果一致。

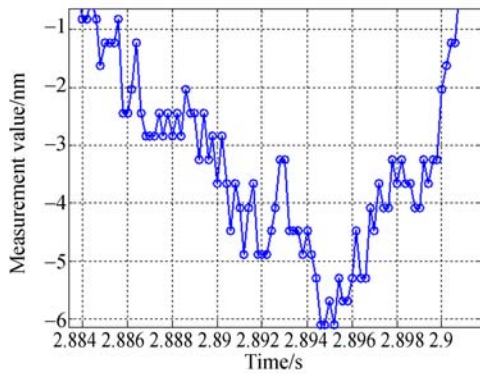


图 7 时域测量结果的局部放大图

Fig. 7 Partial enlargement of time domain measurement drawing

为确定各个频率对测量结果的影响,对图 6 中的时域测量结果进行频域分析,得到如图 8 所示的时域测量结果的幅值谱密度 (Amplitude Spectrum Density, ASD)。ASD 显示:时域测量结果中的波动主要由三方面构成:(1)微动台的正弦运动,主要是 1 Hz 频率点;(2)低频环境扰动导致的死程误差,主要集中在 $0.9 \text{ Hz}&1 \sim 10 \text{ Hz}$ 频段;(3)振动引起的测量噪声,主要集中在中心频率为 21.4,34.6,39.9 及 43.5 Hz 的较窄区域。

对 ASD 进行更进一步的处理得到如图 9 所示的累积幅值谱 (Cumulative Amplitude Spectrum, CAS),以定量评估各个频率的数值。图 10 中的 CAS 显示,平面镜干涉仪的时域测量结果的

3σ 值为 37.68 nm@0.1~2 500 Hz,光栅干涉仪的时域测量结果 3σ 值为 17.15 nm@0.1~2 500 Hz。测量波动主要来源于以下三方面:

(1)微动台 1 Hz/10 nm 的运动位移:PMI 测量结果为 1.62 nm (3σ) @1 Hz,GI 测量结果为 4.22 nm (3σ) @1 Hz。

(2)死程误差:常规实验室环境下,PMI 的死程误差达 31.11 nm (3σ) @$0.9 \text{ Hz}&1 \sim 10 \text{ Hz}$,而 GI 的死程误差仅为 7.59 nm (3σ) @$0.9 \text{ Hz}&1 \sim 10 \text{ Hz}$。同等环境下,GI 的低频死程误差远低于 PMI,故 GI 的环境鲁棒性远高于 PMI。

(3)外界振动噪声:外界振动造成的 PMI 和 GI 的测量噪声基本一致,噪声值为 4.68 nm (3σ) @21.4,34.6,39.9 及 43.5 Hz。时域测量结果的 MA 的 ASD 和 CAS 表明:通过 MA 算法,振动引起的测量噪声得到了极大的抑制。

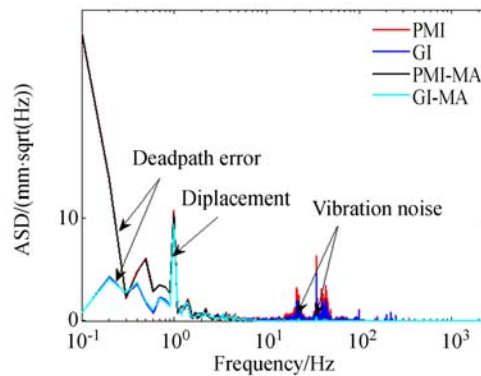


图 8 时域测量结果的幅值谱密度

Fig. 8 ASD of time domain measurement result

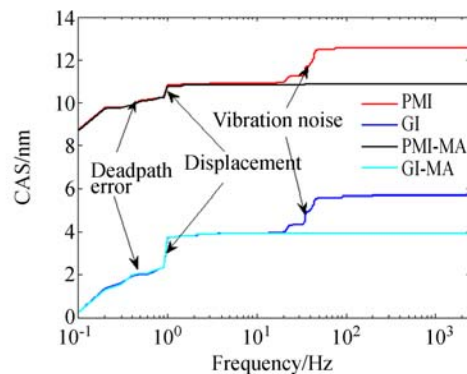


图 9 时域测量结果的累积幅值谱

Fig. 9 CAS of time domain measurement result

综上所述,同等环境下,GI 的低频死程误差值远低于 PMI,故 GI 的环境鲁棒性远高于 PMI。

对比实验装置中 PMI 的死程约为 60 mm, 实际使用过程中, PMI 死程与测量行程的总和将达到几百毫米, 届时 PMI 由环境引起的测量误差将更大; 而 GI 则通过增加光栅尺的长度来增加测量行程, 死程误差非常小且基本保持不变, 故 GI 具有很高的环境鲁棒性。

5 结 论

本文设计实现了结构紧凑、尺寸小(48 mm×

48 mm×18 mm)、分辨率高(0.41 nm)、环境鲁棒性高的新型外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统。该系统有望用于扫描干涉光刻机工作台的超精密运动控制, 以提高扫描干涉光刻机的环境鲁棒性。光栅干涉仪位移测量系统的测量误差主要包括环境误差、仪器误差和几何误差, 死程误差仅是环境误差的一部分。为实现系统纳米甚至亚纳米级的测量精度, 后续还需要开展诸如偏振混叠、电子噪声、波前畸变、热漂移等一系列误差的研究。

参考文献:

- [1] BRITTEN J, 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] SHIBAZAKI Y, KOHNO H, HAMATANI M, *et al.*. An innovative platform for high-throughput high-accuracy lithography using a single wafer stage [J]. *SPIE*, 2009, 7274: 72741I.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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)
- [7] JITSUNO T, MOTOKOSHI S, OKAMOTO T, *et al.*. Development of 91 cm size gratings and mirrors for LEX laser system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112(3): 032002.
- [8] HOLZAPFEL W. Advancements in displacement metrology based on encoder systems[C]. *Proceedings of the 23th annual meeting of the American Society for Precision Engineering*, ASPE, 2008: 71-74.
- [9] WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. Progress on scanning beam interference lithography tool with high environmental robustness for patterning large size grating with nanometre accuracy[C]. *Proceedings of the 17th Annual Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, EUSPEN, 2017: 173-177.
- [10] 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.
- [11] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 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.
WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. Ultra-precision control of homodyne frequency-shifting interference pattern phase locking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5): 1213-1221. (in Chinese)
- [12] LEE J Y, CHENA H Y, HSUB C C, *et al.*. Optical heterodyne grating interferometry for displacement measurement with subnanometric resolution[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 137(1): 185-191.
- [13] GUAN J, KOCHERT P, WEICHERT C, *et al.*. A high performance one-dimensional homodyne encoder and the proof of principle of a novel two-dimensional homodyne encoder[J]. *Precision Engi-*

- neering, 2013, 37(4): 865-870.
- [14] CHENG F, FAN K CH. Linear diffraction grating interferometer with high alignment tolerance and high accuracy[J]. *Applied Optics*, 2012, 50(22): 4550-4556.
- [15] KAO C F, LU S H, SHEN H M, *et al.*. Diffractive laser encoder with a grating in Littrow configuration[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(3): 1833-1837.
- [16] KAO C F, CHANG C C, LU M H. Double-diffraction planar encoder by conjugate optics [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(2): 023603.
- [17] HSU C C, WU C C, LEE J Y, *et al.*. Reflection type heterodyne grating interferometry for in-plane displacement measurement[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(9): 2582-2589.
- [18] LEE C K, WU C C, CHEN S J, *et al.*. Design and construction of linear laser encoders that possess high tolerance of mechanical runout[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(31): 5754-5762.
- [19] WU C C, HSU C C, LEE J Y, *et al.*. Optical heterodyne laser encoder with sub-nanometer resolution[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(4): 045305.
- [20] WU C C, CHENG CH Y, YANG Z Y. Optical homodyne common-path grating interferometer with sub-nanometer displacement resolution [J]. *SPIE*, 2010, 7791: 779105.
- [21] HSIEH H L, LEE J Y, WU W T, *et al.*. Quasi-common-optical-path heterodyne grating interferometer for displacement measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(11): 115304.
- [22] 高平. 高精度衍射光栅干涉位移传感器及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- SHANG P. *Study on the Key Technology of High-resolution Diffraction Grating Interferometric Transducer of Linear Displacements* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [23] DEMAREST F C. High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(7): 1024-1030.
- [24] BIRCH K P, DOWNS M J. Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air [J]. *Metrologia*, 1994, 31(4): 315-316.
- [25] BIRCH K P, DOWNS M J. An updated Edlén equation for the refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1993, 30(3): 155-162.
- [26] 金群峰. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- JIN Q F. *Study on the Affecting Factors of Atmospheric Refractive Index*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)

作者简介:



王磊杰(1988—),男,河南周口人,博士,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、超精密光栅干涉仪位移测量和超精密激光干涉仪位移测量等技术的研究。E-mail: wang-lj66@mail. tsinghua. edu. cn

导师简介:



朱煜(1965—),男,江苏兴化人,教授,博士生导师,1983年于北京师范大学获得学士学位,1993年、2001年于中国矿业大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为面向 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。Email: zhuyu@ tsinghua. edu. cn