中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

扫描干涉曝光系统中双频激光干涉测量误差建模与分析

王新宇 李文昊 王玮 刘兆武 姜珊 周文渊 巴音贺希格

Error modeling and analysis of dual-frequency laser interferometry in scanning beam interference lithography system

WANG Xin-yu, LI Wen-hao, WANG Wei, LIU Zhao-wu, JIANG Shan, ZHOU Wen-yuan, Bayanheshig

引用本文:
王新宇, 李文昊, 王玮, 刘兆武, 姜珊, 周文渊, 巴音贺希格. 扫描干涉曝光系统中双频激光干涉测量误差建模与分析[J]. 中国光学, 2025, 18(2): 224−236. doi: 10.37188/CO.2024−0149
WANG Xin-yu, LI Wen-hao, WANG Wei, LIU Zhao-wu, JIANG Shan, ZHOU Wen-yuan, Bayanheshig. Error modeling and analysis of dual-frequency laser interferometry in scanning beam interference lithography system[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 224-236. doi: 10.37188/CO.2024-0149

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024−0149

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间激光干涉仪激光抖动噪声抑制研究

Noise suppression of laser jitter in space laser interferometer

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1426 https://doi.org/10.37188/CO.2021−0045

面向空间激光干涉的多通道相位测量系统

Multi−channel phase measurement system for the space laser interferometry

中国光学（中英文）. 2023, 16(5): 1089 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0258

双面抛光晶圆干涉测量法及误差分析

Interferometry of double−sided polished wafer and error analysis

中国光学（中英文）. 2023, 16(4): 916 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0226

非线性系统中双频光栅相位测量

Phase measurement with dual−frequency grating in a nonlinear system

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 726 https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022−0013

面向天基引力波探测的时间延迟干涉技术

Time−delay interferometry for space−based gravitational wave detection

中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 275 https://doi.org/10.37188/CO.2020−0098

基于主成分分析的白光干涉微观形貌测量算法

White light interferometry micro measurement algorithm based on principal component analysis

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 637 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0172

文章编号 2097-1842(2025)02-0224-13

扫描干涉曝光系统中双频激光干涉测量误差建模与分析

王新宇[1,2], 李文昊[1*], 王 玮[1], 刘兆武[1], 姜 珊[1*], 周文渊[1,2], 巴音贺希格[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 101408）

摘要: 扫描干涉场曝光技术 (SBIL) 是制作单体大面积高精度光栅的有效途径, 采用双频激光干涉仪反馈工作台位置进行干涉条纹的精确拼接, 会不可避免地引入光栅刻线误差, 导致光栅衍射波前质量降低。针对工作台的位移测量误差, 分析了激光干涉仪自身结构因素引起的本征误差, 提出了复杂环境下激光干涉仪本征误差的指标评价方法。建立了实际工况与经验公式相结合的死程误差和测量光程变化误差理论模型。通过构建平移和旋转算子, 推导了工作台任意点旋转和平移之间的耦合关系, 模拟了不同工作台姿态滚转角下的测量误差。进行了位移误差实验和光栅扫描曝光实验。实验结果表明, 位移误差与理论计算结果一致, 制作 200 mm×200 mm 光栅的衍射波前为 0.278λ@632.8 nm。本文分析方法贯通了光栅衍射波前与测量误差的传递链路, 为制作米级尺寸纳米精度全息光栅奠定了理论和实验基础。

关 键 词: 扫描干涉场曝光系统; 衍射波前; 工作台位移测量; 双频激光干涉仪; 误差分析
中图分类号: TP394.1;TH691.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2024-0149 **CSTR:** 32171.14.CO.2024-0149

Error modeling and analysis of dual-frequency laser interferometry in scanning beam interference lithography system

WANG Xin-yu[1,2], LI Wen-hao[1*], WANG Wei[1], LIU Zhao-wu[1], JIANG Shan[1*],
ZHOU Wen-yuan[1,2], Bayanheshig[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* 101408, *China*）
* *Corresponding author, E-mail: liwh@ciomp.ac.cn; jiangshan*0122@126.*com*

Abstract: Scanning Beam Interference Lithography (SBIL) is an effective way to fabricate monomeric large-area high-precision gratings. Using dual-frequency laser interferometer feedback table position to splice interference fringes accurately, the measurement error will inevitably introduce grating engraving error and reduce the diffraction wavefront quality of grating. The intrinsic error caused by the laser interferometer's structure was analyzed, and the evaluation method of the intrinsic error index of the laser interferometer in

收稿日期: 2024-08-28; **修订日期:** 2024-09-24
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFB3606100); 国家自然科学基金资助项目(No. U21A20509, 52275554)
Supported by National Key R & D Program of China (No. 2022YFB3606100); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. U21A20509,52275554)

complex environments was proposed. The theoretical models of dead path error and measuring optical path variation error combined with actual working conditions and empirical formulas were established. The coupling relationship between rotation and displacement of any table point was deduced by constructing translation and rotation operators, and the measurement errors under different table attitude roll angles were simulated. The displacement error experiment and grating scanning exposure experiment were carried out. The experimental results show that the displacement error is consistent with the theoretical calculation results. The diffraction wavefront of the 200 mm×200 mm grating is 0.278λ@632.8 nm. The analytical method in this paper connects the transmission link between the grating diffraction wavefront and the measurement error, laying a theoretical and experimental foundation for the fabrication of meter-size nano-precision holographic gratings.

Key words: scanning beam interference lithography system; diffraction wave front; table displacement measurement; dual-frequency laser interferometer; error analysis

1　引　言

衍射光栅因其独特的光束调制作用而具有分光和移相功能, 被誉为激光调制、光谱分析和位移传感等高端仪器的心脏[1-3], 作为核心器件应用于惯性约束核聚变、天文观测光谱仪、高端光刻机等高端精密仪器装备之中, 衍射波前是光栅应用的重要参数[4-6]。在惯性约束核聚变中, 大口径脉冲压缩光栅是啁啾脉冲放大系统中提供超短脉冲、超强激光的关键, 光栅衍射波前误差引入的系统波像差使得脉冲展宽和压缩后光束波前产生变形, 经过长距离传播或聚焦后在作用面将出现光斑弥散或变形, 导致光束能量分散, 激光作用效果下降。在天文观测光谱仪中, 需要使用大尺寸高精度的衍射光栅提高集光量和信噪比, 光栅衍射波前误差会导致光栅在系统中额外引入相位调制误差, 进而使得系统出瞳波像差劣化, 像面点列图尺寸增大, 最终导致光谱分辨率以及系统探测极限出现劣化。因此, 光栅制作过程中衍射波前的精确控制对于研制高品质光栅至关重要。

扫描干涉场曝光 (SBIL) 技术是一种大尺寸全息光栅制造技术[7-10]。其原理是采用小尺寸的高斯光束在束腰处干涉, 利用工作台的二维运动, 通过扫描(*Y* 方向)曝光的方式将干涉条纹记录在基底上, 垂直条纹方向(*X* 方向)精确步进拼接干涉条纹相位, 从而实现大尺寸全息光栅的制作[11-13]。在动态拼接过程中, 由于工作台为非理想运动, 故需要通过精密工作台位置测量和高精度干涉条纹位置测量, 获取准确的工作台位移和曝光光束的相位变化, 同时利用动态相位锁定系统调控干涉条纹相位, 实现相邻干涉条纹重叠部分的相位精确拼接, 补偿工作台运动误差引起的光栅刻线误差, 以提高光栅的衍射波前质量。因此, 工作台 *X* 方向的位移测量精度是决定大面积高精度光栅制作成败最为关键的因素之一[14]。

常用的工作台测量方法主要包括激光干涉测量[15-18] 和高精度光栅测量[19-21]。光栅干涉测量技术以光栅栅距为测量基准, 但其以与被测物体机械连接的读数头作为位置反馈, 并不适用于步进扫描式的二维工作台的位移测量。最适合长行程、高精度二维工作台位移的测量技术是激光干涉仪测量技术[22]。然而, 激光干涉测量是以激光波长为测量基准的, 当测量量程增大时, 诸如测量环境变化等因素会使得测量误差显著增加, 因此, 十分有必要对激光干涉仪存在的误差进行详细分析。

为了对激光干涉仪精度进行分析和补偿, 林荣炜[23] 等人提出了一种六轴外差干涉仪系统, 并建立了相应的误差补偿模型, 提高了工作台的测量精度; 吴炳阳[24] 针对激光测量系统中的环境补偿装置结构复杂、成本较高的问题, 研究了一种便携式且能修正空气折射率测量精度的小型化装置, 将传感器修正后的数据与 Edlen 公式法相结合, 空气折射率的检测精度可达到$\pm 5.13\times10^{-8}$; 宋磊建立了光刻机工作台与激光干涉仪的六自由度测量模型, 在位移和角度上的模型误差达到了纳米和纳弧度的精度[25]。然而, 从上述研究可以发现, 目前对激光干涉仪和工作台位移误差的分析

都是针对某一特定影响因素，并未系统和全面地对测量误差进行分析。本文基于 SBIL 系统的真实工况和光栅衍射波前的质量需求，建立了光栅刻线误差与位移测量误差关系的数学模型，并且针对测量系统的本征误差、环境误差以及工作台姿态误差进行了详细的分析。通过设计与光栅干涉仪的稳定性比对实验和光栅制作实验，验证了误差模型和误差分析方法的准确性。

2 基于双频激光干涉测量的 SBIL 系统刻线误差模型

2.1 刻线误差控制模型

SBIL 技术采用小尺寸的高斯光束在束腰处干涉，形成等周期直条纹，利用工作台 Y 方向扫描和 X 方向步进拼接，将干涉条纹曝光在光栅基底表面上，以制作大尺寸全息光栅，原理如图 1 所示。

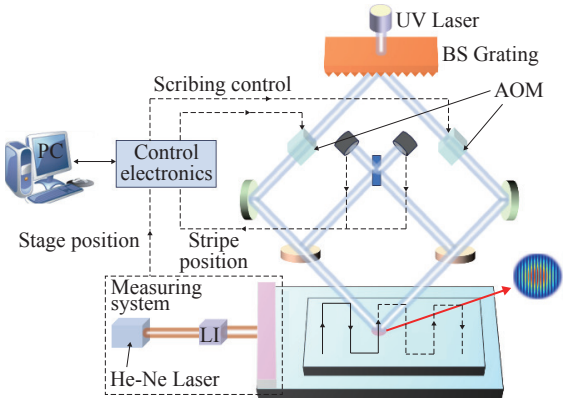

图 1 扫描干涉场曝光系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scanning beam interference lithography system

激光分束后通过对称路径以相同光束尺寸传播，在束腰处发生干涉，可以将曝光光束看作具有高斯轮廓的平面光，以光栅基底表面零位为原点建立坐标系，在 x 位置左右两侧光束的电场分布可写为以下形式：

$$\begin{aligned} E_1 &= A_1 \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w^2}\right)\exp\left[j(x\boldsymbol{k}\sin\theta-\boldsymbol{k}L_1+\varphi_0+2\pi f_1 t)\right]\hat{y} \\ E_2 &= A_2 \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w^2}\right)\exp\left[j(-x\boldsymbol{k}\sin\theta-\boldsymbol{k}L_2+\varphi_0+2\pi f_2 t)\right]\hat{y} \end{aligned} \quad , \tag{1}$$

其中，A_1 和 A_2 分别为两曝光光束的能量常数，L_1 和 L_2 为曝光光束经分束光栅分光后到曝光区域的光程，波矢量 $\boldsymbol{k}=2\pi/\lambda$，其中 λ 为曝光光束波长，f_1、f_2 分别为两曝光光束的频率，w 为两曝光光束在干涉场位置的光斑半径，φ_0 为相位常数，$\hat{y}$表示 y 方向的方向矢量。干涉场强度分布$I(x,y,t)$可表示为：

$$I(x,y,t)=A\exp\left(-2\frac{x^2+y^2}{w^2}\right)\left[1+\gamma_0\cos\varphi(x,t)\right] \quad , \tag{2}$$

其中：

$$\begin{cases} A=\sqrt{\varepsilon/\mu}\left(A_1^2+A_2^2\right)/2 \\ \gamma_0=2A_1A_2/\left(A_1^2+A_2^2\right) \\ \varphi(x,t)=2\pi\left(2\boldsymbol{k}x\sin\theta+\left(\dfrac{L_2-L_1}{\lambda}\right)+(f_1-f_2)t\right) \end{cases} . \tag{3}$$

设扫描 Y 方向速度为 v，光栅基底表面的曝光量为 N 次扫描曝光的曝光量之和，具体表示为：

$$D(x,y)=\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{v}\int_{-\infty}^{+\infty}I(x,y,t)\,\mathrm{d}y\propto\cos\left(\Phi_{\mathrm{e}}(x,t)\right) \quad , \tag{4}$$

其中，Φ_{e} 为 N 次扫描曝光后的曝光相位分布，可以看出，N 次扫描曝光后，Φ_{e} 由第 n 次扫描刻线误差分布和相邻刻线误差分布的权重比例决定，Φ_{e} 可以近似为第 n 次扫描的曝光相位分布：

$$\Phi_{\mathrm{e}}(x,t)\approx\varphi(x,t)= 2\pi\left(\frac{x+x_{\mathrm{d}}}{p}+\left(\frac{L_2-L_1}{\lambda}\right)+(f_1-f_2)t\right) \quad , \tag{5}$$

其中，x_{d} 为工作台的运行误差，$p=\lambda/2\sin\theta$ 为曝光光栅周期，光栅刻线误差 S 可以表示为：

$$S=x-\frac{p}{2\pi}\Phi_{\mathrm{e}}(x,y)= x_{\mathrm{d}}-p\left(\frac{L_2-L_1}{\lambda}\right)-p\int(f_1-f_2)\mathrm{d}t \quad . \tag{6}$$

由式 (6) 可以看出，刻线误差由 3 项因素共同决定，其中，x_{d} 由工作台运动误差决定，$p(L_2-L_1)/\lambda$ 由两曝光光束光程差决定，系统稳定时，该项保持不变，$p\int(f_1-f_2)\mathrm{d}t$是曝光光束调频与时间相关的相位项，是相位控制系统的调整对象[26]。可见，通过控制两曝光光束频率差可以补偿工作台的定位误差，从而调控光栅刻线误差。SBIL 系统中使用双频激光干涉仪测量工作台的实时位

移, 并反馈到相位控制系统, 以补偿光栅制作过程中工作台的运动误差。然而, 当激光干涉仪存在测量误差时, 测量误差会引入刻线误差, 导致衍射波前质量下降。

2.2　SBIL 系统双频激光干涉位移测量模型

SBIL 系统中使用双频激光干涉仪测量工作台位移, 图 2(彩图见期刊电子版)为双频激光干涉测量系统原理示意图。如图 2 所示, 从双频激光器中出射的具有一定频差的正交线偏振光经过偏振分束棱镜 PBS 后, 频率为 f_a 的反射光经过 1/4 波片到达参考反射镜, 反射后再次经过 1/4 波片返回 PBS 被 PBS 透射至角锥棱镜, 经角锥棱镜反射后 PBS 透射再次经过 1/4 波片到达参考反射镜, 反射后经过 1/4 波片返回 PBS 被 PBS 反射被接收器接收。同理, 频率为 f_b 的透射光在经过多次折转后被接收器接收, 两束光发生干涉。下面是位移测量的原理。

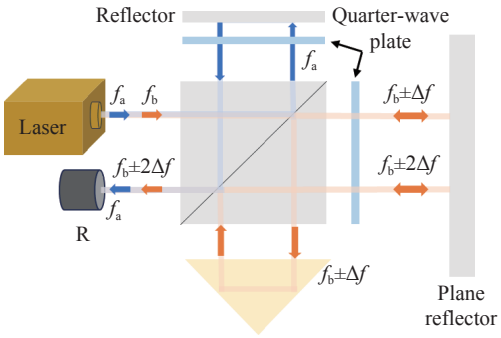

图 2　双频激光干涉测量系统原理图

Fig. 2　Schematic diagram of dual-frequency laser interferometry system

设激光器发出的两种频率激光的初始相位分别为 φ_{10} 和 φ_{20}, 角频率分别为 ω_{10} 和 ω_{20}, 波长分别为 λ_{10} 和 λ_{20}, 其光波方程分别为:

$$\begin{aligned} E_1 &= A_1\cos(\omega_1 t+\varphi_{10}) \\ E_2 &= A_2\cos(\omega_2 t+\varphi_{20}) \end{aligned} \quad . \tag{7}$$

当测量镜运动时, 由于多普勒效应, 测量光的相位由测量臂光程 $D_M(t)$ 调制而发生变化, 其光波方程为:

$$E_M = A_1\cos(\omega_{10}t-4\pi D_M(t)/\lambda_{10}+\varphi_{10}) \quad . \tag{8}$$

参考光在参考臂中产生与参考臂光程 D_R 相关的相位变化, 参考光的光波方程为:

$$E_R = A_2\cos(\omega_{20}t-4\pi D_R/\lambda_{20}+\varphi_{20}) \quad . \tag{9}$$

测量光和参考光合成后形成干涉光, 其波动方程为 E_M+E_R, 经高通滤波器滤除直流成分后的干涉光称为测量信号:

$$I\propto\cos\left\{(\omega_{10}-\omega_{20})t+4\pi\left[\frac{D_M(t)}{\lambda_{10}}-\frac{D_R}{\lambda_{20}}\right]+\varphi_{10}-\varphi_{20}\right\}. \tag{10}$$

可见测量信号是中心频率为 ω_{10}−ω_{20} 的交流信号, 其初相位由测量臂光程 $D_M(t)$ 调制, 当测量臂光程每发生一个激光波长变化时, 测量信号初相位将变化 2π。位移测量的基本模型为:

$$\Delta x=\frac{\lambda_l}{2m\pi}\Delta\phi_l \quad , \tag{11}$$

其中, m 为测量系统的光学细分数, λ_l 为激光器的中心波长, $\Delta\phi_l$ 表示位移过程中的相位变化, 数据采集处理系统会将相位进行 K 倍电子细分, 相位变化与脉冲个数 N 之间的关系为:

$$\phi=N\frac{2\pi}{K} \quad . \tag{12}$$

用 N_l 表示激光干涉仪的计数值变化, 则位移数据可表示为:

$$\Delta x_l=\frac{\lambda_l}{mK}N_l \quad . \tag{13}$$

综上所述, 激光干涉仪的测量误差是影响光栅的衍射波前制作精度最关键的因素之一。因此, 对激光干涉仪存在的误差进行详细分析十分必要。

3　SBIL 系统位移测量误差分析

导致工作台位移测量结果出现误差的因素主要有以下几点: (1)激光干涉仪自身固有的本征误差; (2)环境的变化而引入的测量误差; (3)运动过程中工作台姿态引入的测量误差。下面将详细分析这 3 类误差。

3.1　双频激光干涉仪的本征误差

(1)光源波长稳定性。双频激光器选用基于塞曼效应 KEYSIGHT-5517C 激光头, 波长长期稳定性为±0.02×10^{-6} m。工作台曝光行程为 L mm 时, 光源波长稳定性引起的工作台测量长期重复性测量误差为±0.02×L nm。

(2)干涉仪电子学误差。干涉光经过接收器接收后, 将光信号转换为电信号, 然后经过测量板

卡进行电子细分，提升位移测量的分辨能力。电子误差等于最小分辨率计数的不确定度。依据双频激光干涉仪使用手册，由电子学误差引起的工作台位置测量误差为 0.15 nm。

（3）非线性误差。光学非线性是由于一个偏振分量的光泄漏到另一个偏振分量上，激光干涉测量系统中光学元件由于无法完全分离两个激光束分量（垂直和水平偏振）而导致的测量误差。依据双频激光干涉仪使用手册，标定后的干涉仪的非线性误差为 4.4 nm。

（4）光学热漂移。激光干涉仪 KEYSIGHT 10706B 的光学热漂移误差系数经过标定可以控制在 2 nm/ °C 以内，实验室温度变化控制在±T °C 内，能够得出光学热漂移误差为 2×T nm。

（5）测量镜面形误差。工作台做步进扫描运动时，测量镜面形误差会引起测量误差，大小等于测量镜面形 PV 值，本文实验设计使用测量镜面形为 0.1λ@632.8 nm，理论上引入的测量误差为 63.28 nm。

3.2 环境变化引入的测量误差

环境变化会带来两方面误差：一方面是由于参考光束与测量光束不完全对称产生的光程差（死程），环境波动时光程差将导致死程误差；另一方面，由于环境变化会改变测量光束在测量光路中的折射率和波长，由此引起的测量误差。

（1）死程误差。死程误差是由干涉仪和测量反射镜之间的光程未得到补偿引起的，死程误差示意图如图 3（彩图见期刊电子版）所示。

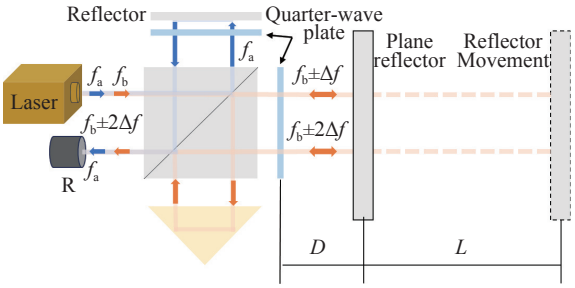

图 3 死程误差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dead path error

死程距离 D 是指激光束的参考分量和测量分量在零点处的光程长度之差。如果该差值在变化的环境中没有得到适当补偿，就会产生测量误差。当测量镜处于静止状态，而激光束周围的环境条件发生了变化时，这些环境变化将导致激光束波长在整个路径（D+L）上发生变化，因此应该进行补偿。由于激光干涉仪系统只测量“运动波长”，只涉及距离“L”，因此系统不会校正波长在“D”上的变化。这将导致零位发生明显移位。这种零移就是死程误差，在测量过程中只要环境条件发生变化就会出现死程误差，其可表示为：

$$\Delta x_D = \Delta n \times D \quad . \tag{14}$$

由上式可知，激光干涉仪的死程误差与空气折射率变化和死程距离有关。空气折射率的波动量可由修正后的 Edlen 公式计算得出[27, 28]：

$$\Delta n_{tpf} = 1 + \frac{P(n-1)_s}{96\,095.43} \times \frac{1 + 10^{-8} P(0.612\,8 - 0.099\,8T)}{1 + 0.003\,661T} - (4.292\,2 - 0.034\,3\sigma^2) \times 10^{-10} \times RH \times F_0 \quad , \tag{15}$$

式中，P 为气压值（Pa），T 为温度值（°C），$(n-1)_s$ 是标准状态下（T=22 °C，P=101 325 Pa）的空气折射率，RH（以百分数表示）为相对湿度，指空气中水蒸气压力与相同温度下湿度饱和的水蒸气压力的比值，F_0 为空气饱和蒸汽压力（Pa），σ 为光在真空中的波数（μm^{-1}）。分别对 T、P、RH 求偏微分，可得到标准环境下对空气折射率的影响系数，如表 1 所示。

取湿度为 50%，大气压强变化范围为 101 325~101 425 Pa，温度变化范围为 19.99 °C~20.01 °C，模拟折射率随温度与压强的变化，如图 4（彩图见期刊电子版）所示。

表 1 空气折射率影响系数

Tab. 1 Influence coefficient of air refractive index

参数	数值
标准空气折射率	1.000 273
激光器真空波长/nm	632.991 528
空气波长/nm	632.818 663
温度敏感性/°C^{-1}	−1.004×10^{-6}
湿度敏感性/(%RH)$^{-1}$	−6.401×10^{-9}
压强敏感性/Pa^{-1}	0.200×10^{-8}

图 4 中，蓝色线条表示温度与空气折射率的关系，可见，随着温度的升高，空气折射率变小，

取压强为 101 325 Pa, 当温度由 19.99 °C 变化到 20.01 °C 时, 空气折射率变化量为−2.417×10^{-8}。红色线条表示压强与空气折射率的关系, 可见, 若温度为 20°C 时, 当压强从 101 325 Pa 变化到 101 345 Pa 时, 对应的空气折射率变化量为 5.20×10^{-8}。由此可知, 二者对折射率的影响都很大, 并且折射率对温度和压强的变化更敏感。因此, 在实际工作情况下, 对温度和压强进行控制是十分必要的。结合实际实验室环境控制能力, 可将温度变化控制到 ΔT=±0.1 °C、压强变化控制到 ΔP=±50 Pa、湿度变化控制到 ΔRH=±2%。根据 Edlen 公式, 可计算出上述条件下的空气折射率波动量为 Δn=±10.23×10^{-8}。通过机械设计结果知, 激光干涉仪死程距离控制在 500 mm 内, 带入公式 (14), 可计算得到由空气折射率波动引起的激光干涉仪死程误差为±51.15 nm。

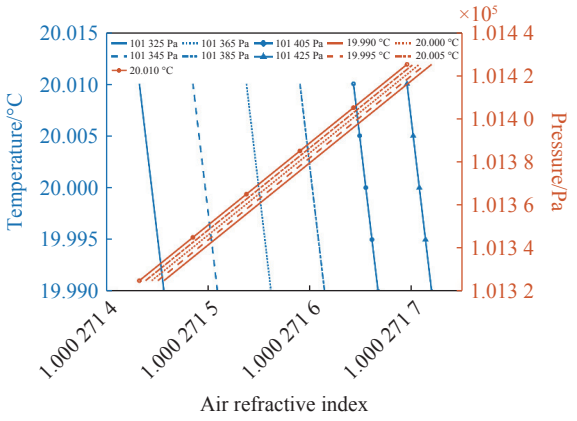

图 4　空气折射率随温度和压强变化曲线

Fig. 4　Air refractive index's curve variation with different temperatures and pressures

(2)环境扰动引起的光程变化误差。空气中的温度、湿度、大气压强等环境参数的扰动会引起激光波长的变化, 进而造成光程变化。由公式 (13) 可知, 测量值与激光波长呈正相关, 故激光波长的变化会引起测量误差。

在扫描干涉场中, 通常使用波长跟踪器实时监测测量光路中空气折射率的变化, 波长跟踪器的折射率初始值影响光栅栅距的绝对值, 不影响光栅的衍射波前, 故可以忽略折射率初始值对衍射波前误差的影响。将折射率初始值设为 1.000 273。波长跟踪器的重复性精度公式为:

$$S=\pm\left[0.028+\frac{0.15}{127}+\frac{0.06\Delta T}{°\mathrm{C}}+\frac{0.002\Delta P}{\mathrm{mmHg}}\right]\times10^{-6}. \tag{16}$$

实验室的外界环境参数设置如下: 温度变化 ΔT=±0.1 °C、压强变化 ΔP=±50Pa、湿度变化 ΔRH=±2%, 将环境参数代入公式 (16), 可得波长跟踪器的补偿重复性精度为±0.135×10^{-6}。当曝光行程测量范围为 L mm 时, 测量重复性精度优于±0.135×L nm。

3.3　工作台姿态变化引入的测量误差

工作台滚转角将影响激光干涉仪的测量精度, 图 5 (a) 所示为工作台处于零度方向, X 轴光栅干涉仪光线与测量镜交点为 Q。工作台坐标原点为 O。现在考虑工作台围绕原点旋转 θ_z, 如图 5(b) 所示, 测量镜上的点 Q 在 x 方向平移了 δ_x, 在 y 方向平移了 δ_y。测量系统现在测量的是点 S 的 x 坐标。

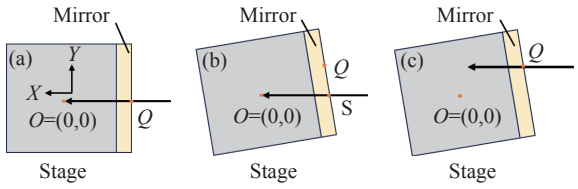

图 5　滚转角对激光干涉仪测量精度的影响。(a) 理想情况下, x 轴测量镜测量点 Q 的位置; (b) 工作台在原点 O 处旋转 α 角; (c) 工作台在标记点 Q 旋转 α 角。

Fig. 5　The impact of roll angle on laser interferometers measurement accuracy. (a) The position of measuring point Q when the workbench is not rotating. (b) Workbench rotates α at origin O. (c) Workbench rotates α around point Q

由于围绕原点的旋转可以看作是围绕任意点的旋转加上平移, 则当如图 5 (c) 所示, 工作台围绕点 Q 旋转, 在这种情况下, Q 点位置相对旋转是不变的。图 5 (b) 中工作台的方向可以通过执行图 5 (c) 中的旋转, 然后进行平移 (δ_x,δ_y) 来获得。据此, 本文提出了一种确定 Q 点位置的方法。首先令工作台围绕点 Q 旋转, 其次, 将工作台平移 (δ_x,δ_y)。计算 (δ_x,δ_y) 的方法是在 Q 周围应用旋转算子, 并将其与原点 O 处应用的旋转算子进行比较。

设工作台旋转角度 α, 工作台上任意向量绕原点旋转的旋转算子可以表示为:

$$\boldsymbol{R}_H(\alpha)=\begin{bmatrix}\cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0\\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \tag{17}$$

正常情况下旋转算子应为 2×2 的矩阵, 但为

了允许额外的平移自由度，对矩阵进行了齐次变换。平移算子可以表示为：

$$\boldsymbol{T}(\delta_x,\delta_y)=\begin{bmatrix}1&0&\delta_x\\0&1&\delta_y\\0&0&1\end{bmatrix}. \tag{18}$$

利用两种算子形式，点 $Q(q_x,q_y)$ 的旋转可以表示为 $\boldsymbol{R}'=\boldsymbol{T}^{-1}(-q_x,-q_y)\boldsymbol{R}_H\boldsymbol{T}(-q_x,-q_y)$。给点 O 指定一个参考系，给点 Q 指定一个参考系。把 Q 参照系中作用的算子表示成它在 O 参照系中的等价形式。这个方法可理解为首先通过应用 $\boldsymbol{T}(-q_x,-q_y)$ 将点 Q 平移回原点，然后应用旋转算子 $(\boldsymbol{R}_H)$ 使其绕原点旋转，最后，再应用平移算子 $\boldsymbol{T}(q_x, q_y)$ 将点 Q 再转换回来。

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{T}(-q_x,-q_y)\boldsymbol{R}_H\boldsymbol{T}(q_x,q_y)=\begin{bmatrix}\cos(\theta_z)&-\sin(\theta_z)&-\cos(\theta_z)q_x+\sin(\theta_z)q_y+q_x\\\sin(\theta_z)&\cos(\theta_z)&-\sin(\theta_z)q_x-\cos(\theta_z)q_y+q_y\\0&0&1\end{bmatrix}. \tag{19}$$

可以观察到，式 (19) 绕原点旋转可以用另一种方法表示为绕点 Q 旋转，再平移 (δ_x,δ_y)。该过程可简写成 $\boldsymbol{R}_H=\boldsymbol{T}(\delta_x,\delta_y)\boldsymbol{R}$，$\delta_x$、$\delta_y$ 可由式 (21) 求出：

$$\begin{cases}\delta_x=\cos(\theta_z)q_x-\sin(\theta_z)q_y-q_x\\\delta_y=\sin(\theta_z)q_x+\cos(\theta_z)q_y-q_y\end{cases}. \tag{20}$$

如果工作台原点在 x 轴干涉仪的测量轴，则 $q_y=0$。但是，如果干涉仪的测量轴与工作台有一个横向的偏移量 $q_y=Y_\Delta$，如图 6 所示。

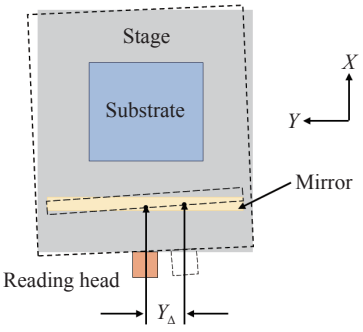

图 6 工作台滚转角误差图

Fig. 6 Workbench roll angle error diagram

此时，由于工作台滚转产生的 X 方向的测量误差为：

$$\delta_x=\cos(\theta_z)q_x-\sin(\theta_z)Y_\Delta-q_x. \tag{21}$$

根据式 (21) 模拟了旋转角度从 1 μrad 到 15 μrad 下工作台测量轴偏移量对激光干涉仪测量误差的影响，结果如图 7（彩图见期刊电子版）所示。当滚转角较小时，公式中 $\sin\theta_z\approx\theta_z$，经过化简后 $\delta_x=-\theta_z^2/2-\theta_zY_\Delta$，二阶项可忽略，可知测量误差几乎不受测量轴偏移量的影响。当工作台的滚转角增大时，二阶项不可忽略，此时测量轴的偏移量越大，对测量误差的影响也越大。

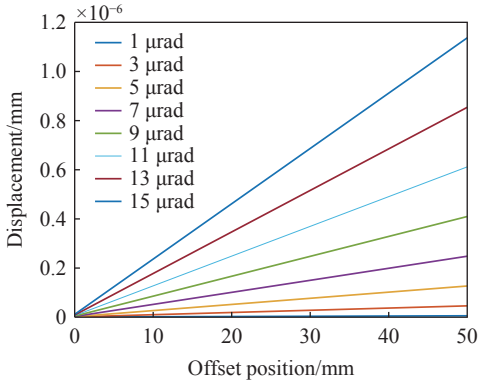

图 7 不同旋转角下测量轴偏移量对测量误差的影响

Fig. 7 Measurement axis offset vs. measurement error at different rotation angles

4 实验测试

4.1 本征误差实验

激光波长误差及电子学误差的大小取决于激光器以及测量板卡的制作水平，有相应测试证书，本文对它们不进行测试实验。对于干涉元件温度变化导致光路热漂移问题，本实验光学元件材料选用 SiO_2，其在 0~100 °C 下的热膨胀系数为 5.5×10^{-7}/°C，实验室温度变化可控制在±0.1 °C 范围内，在此温度范围内热漂移误差可忽略不计。故本小节主要对非线性误差以及测量镜面形误差进行实验分析。

4.1.1 非线性误差实验

非线性误差测量原理如图 8（彩图见期刊电子版）所示，频率分别为 f_a 和 f_b 的重叠光束通过半波片（HWP）后，经偏振分束镜（PBS）分离为平行偏振光束和垂直偏振光束，光强由 D_{M1} 和 D_{M2} 进行检测。实验步骤如下：参考光束与测量光束发生干涉后将通过 HWP，旋转 HWP，使平行或垂直偏振光消光，并记录此时 HWP 的位置。然后

将 HWP 再次旋转 22.5°, 即整个正交偏振光通过 HWP 后旋转 45°, 偏振光束经过 PBS 后分离为平行偏振光束和垂直偏振光束, 分别被接收器 D_{M1} 和 D_{M2} 同时接收。

Agilent 5517D 双频激光干涉仪的非线性误差受非正交激光源和 PBS 等因素的影响, 根据非线性误差计算理论[29], 双频激光干涉仪的非线性误差 PV 值为 4.7 nm, 与理论值相符合。结果如图 9 所示。

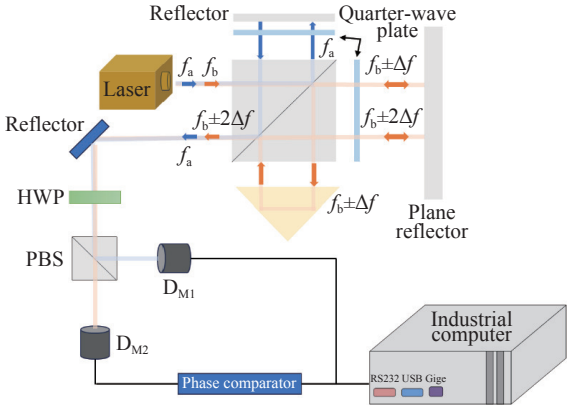

图 8　非线性误差测量原理图

Fig. 8　Principle diagram of nonlinear error measurement

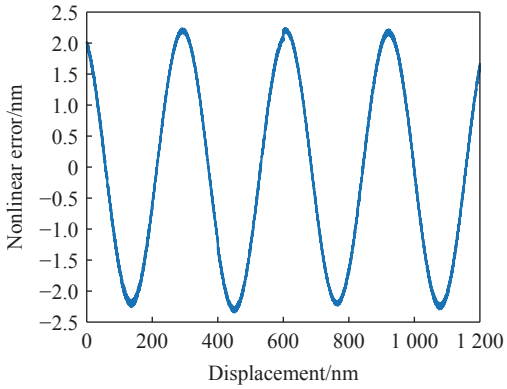

图 9　非线性误差

Fig. 9　Nonlinear error

4.1.2　测量镜面形误差实验

使用 Zygo 干涉仪对所加工的测量镜面形进行测量, 测量结果如图 10(彩图见期刊电子版)所示, 面形结果 PV 值为 0.119λ@632.8 nm, RMS 值为 0.015λ@632.8 nm, 加工结果满足设计指标。

双频激光干涉仪光源的光斑直径为 6 mm, 入射光与反射光之间的高度为 12.7 mm, 选取工作高度附近 30 mm 宽度的子口径面形数据进行测量, 结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示, 面形曲线 PV 值为 51.64 nm, 即由面形引入的位移测量误差为 51.64 nm。

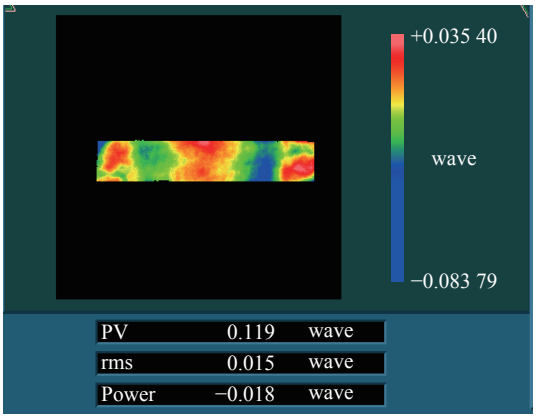

图 10　Zygo 干涉仪检测结果

Fig. 10　Test results of Zygo interferometer

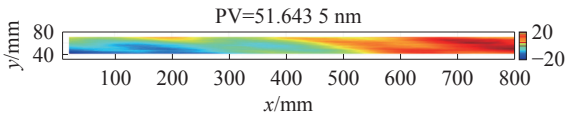

图 11　工作高度处 30 mm 宽度子口径面形数据

Fig. 11　Mirror shape curve measured at working height

4.2　环境测试实验

环境变化引起的误差是影响激光干涉仪测量精度的主要因素, 需要对实验室内的温度、湿度以及压强进行精密测量, 以保证分析的准确性。本文使用的温度传感器是 Fluke Networks L586A, 其测量精度为 0.01 °C, 分辨率为 0.001 °C, 湿度和压强传感器为 Vaisala PTU300, 可同时测量湿度和压强, 压强测量精度为 10 Pa, 分辨率为 1 Pa, 湿度测量精度为 1.7%, 分辨率为 1%。利用两套设备在扫描干涉场曝光系统上进行了环境测试。

扫描干涉场曝光系统制作口径为 200 mm 光栅的曝光时间通常在 3 h 左右, 将工作台置于最边缘处且保持静止, 在 3 h 内进行稳定性位移测试, 并同时使用温湿压传感器记录环境数据。图 12 为传感器所测环境变化情况。由图 12 可以看出, 3 h 内实验室温度变化 PV 值为±0.1 °C, 压强变化 PV 值±50 Pa, 湿度变化 PV 值为±1%。图 13(彩图见期刊电子版)是通过 Edlen 计算得到的位移误差与激光干涉仪误差的对比数据, 可知二者趋势一致。激光干涉仪的最大偏移量为 131.77 nm, 与 Edlen 公式计算的数据差值在 30 nm

以内，造成二者差值的原因在于压强和湿度传感器精度低，且温度计位于激光干涉仪附近，不能精准反映整个光路的温度变化，从而导致 Edlen 公式计算得到的环境误差数据与干涉仪误差数据不能完全重合。

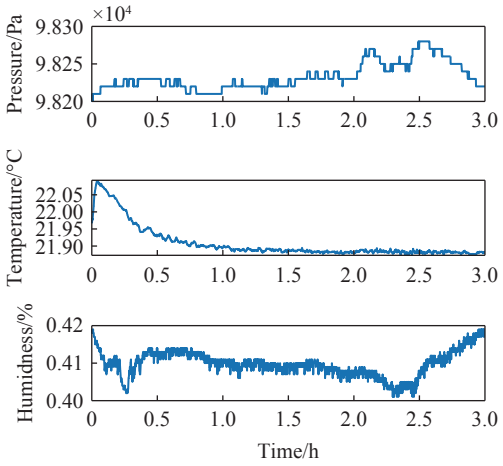

图 12 3 h 内实验室环境变化

Fig. 12 Changes in the laboratory environment during a three hour period

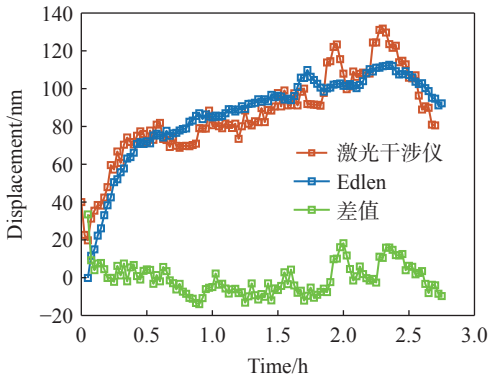

图 13 激光干涉仪数据与环境位移数据对比

Fig. 13 Comparison of wavelength tracker data and environmental data

为了验证误差分析的准确性，本文还设计了与光栅干涉仪的稳定性对比实验，光栅干涉仪以光栅栅距为基准，测量精度受环境影响较小，使用光栅干涉仪做对比实验，稳定性对比实验装置图如图 14 所示。光源采用频差为 2 MHz，波长为 632.8 nm，光斑半径为 3 mm 的双频激光器，其具有干扰能力强、精度高、测量结果可靠的优势。测量镜与上层工作台为刚性连接，可与工作台一起沿扫描方向移动。光栅干涉仪与下层工作台为刚性连接，与工作台一起沿步进方向移动。激光干涉仪曝光系统与所在大理石为刚性连接。在本实验中，采用的是 HAIDENHAIN 商用光栅尺（周期为 488 gr/mm，型号为 Lip201R，长度为 1 840 mm），其与曝光系统为刚性连接。激光干涉仪采用 KEYSIGHT 商用干涉仪（型号：10706B），测量分辨率为 0.15 nm。两套位移测量系统采用同一张计数采集板卡，可实现数据同步采集，采样频率为 1 kHz。利用上述装置，本文在扫描干涉场曝光系统上进行了稳定性实验测试。

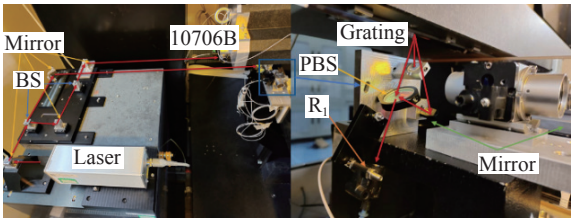

图 14 稳定性实验装置图

Fig. 14 Stability test device diagram

图 15（彩图见期刊电子版）显示了 3 h 内稳定性测试的测量结果，蓝色曲线是光栅干涉仪偏移量，红色曲线是激光干涉仪偏移量。由于高频噪声、环境振动等因素的存在，使两测量系统的曲线不能成为理想的直线，光栅干涉仪位移在零附近波动。除去开始不稳定段，光栅位移测量系统偏移量 PV 值为 77.75 nm。激光干涉仪在 3 h 内偏移量 PV 值为 219.49 nm，二者差值为 141.74 nm。对二者差值进行频谱分析，如图 16（彩图见期刊电子版）所示。可以认为消除了由于外界振动等系统误差的影响，即激光干涉仪的测量误差为 141.74 nm。

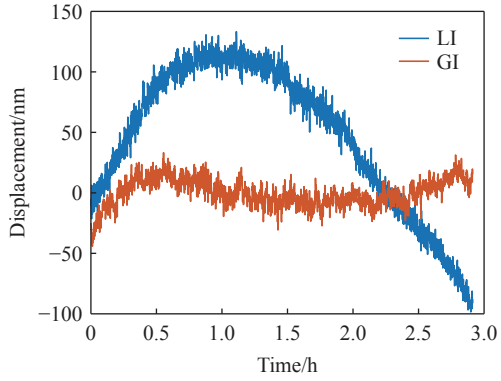

图 15 激光干涉仪与光栅干涉仪稳定性对比

Fig. 15 Comparative stability of the laser interferometer and grating interferometer

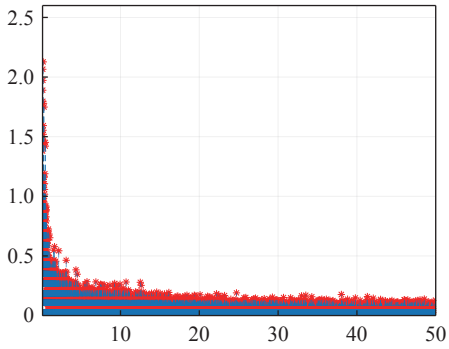

图 16　光栅干涉仪与激光干涉仪差值频谱分析

Fig. 16　Spectrum analysis of the difference between the grating interferometer and laser interferometer

4.3　工作台姿态误差实验

工作台滚转角测量原理如图 17 所示。图 17 由双频激光器发出的光经过分束镜被分为两束, 透射光经干涉仪入射至测量镜, 反射光通过反射镜后经干涉仪入射到测量镜。

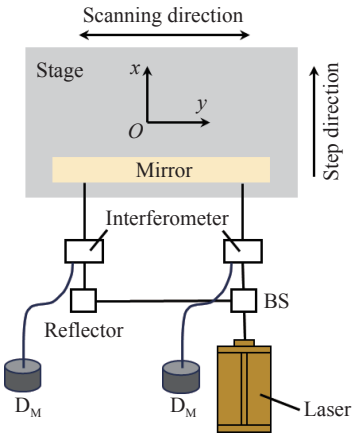

图 17　工作台滚转角测量原理

Fig. 17　Measuring principle of table roll angle

两干涉仪之间的距离为 l_0, 设曝光时任一位置 i, 对应工作台的滚转角为 α_i, 两干涉仪位移数据分别为 l_{i1} 和 l_{i2}, 则角度 α_i 为:

$$\alpha_i = \arctan[(l_{i1} - l_{i2})/l_0] \quad . \tag{22}$$

根据上述原理进行工作台转角测量, 为保证数据同步性, 两干涉仪采用同一张测量板卡, 同时记录数据, 令位移台移动 1 200 mm, 根据式 (22) 可得到工作台滚转角结果, 如图 18 所示。由图 18 可知, 工作台滚转角在±3 μrad 以内。在真实的实验室条件下, 通过光机结构设计可将偏移量控制在 20 mm 以内。根据公式 (20) 可得到由于工作台姿态引起的测量误差小于 18 nm。

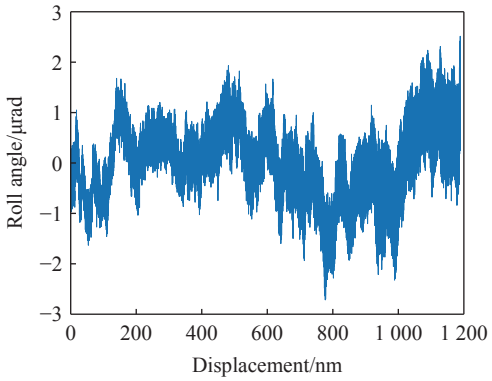

图 18　工作台滚转角测试结果

Fig. 18　Test results of table roll angle

5　光栅曝光实验

5.1　精度分析

所需制作的衍射光栅波前优于 1/3λ@632.8 nm, 尺寸为 200 mm×200 mm×20 mm。在制作过程中, 测量光路采用伸缩式多级嵌套密封结构, 以保证光路密封并隔绝温度和气流冲击, 减小由于工作台运动引起的气流和温度扰动。曝光过程的环境数据如表 2 所示。其中: ΔT=±0.02 °C; 压强变化 ΔP=±50 Pa; 湿度变化 ΔRH=±2%。测量镜面形误差为 51.64 nm; 死程距离为 300 mm, 阿贝偏移量为 20 mm。根据上述各项误差可以得到工作台位置测量系统精度均方根和(Root Sum of Squares, RSS)为 97.95 nm。

表 2　测量系统精度

Tab. 2　Measurement system error　(nm)

误差项	误差值
激光器波长稳定性	8.00
电子学误差	0.15
光学非线性误差	4.40
光学温度漂移误差	0.08
测量镜面形误差	51.64
死程误差	79.73
光程变化误差	12.80
工作台姿态误差	18.00
RSS	97.95

5.2　200 mm×200 mm 光栅曝光实验

基于上述激光干涉仪的误差分析, 本文使用

尺寸为 200 mm×200 mm×20 mm，曝光区域内光栅基底面形误差优于 0.105λ(λ=632.8 nm)的光栅基底进行扫描曝光实验。曝光系统曝光光束波长为 413.1 nm，激光器输出功率为 260 mW，设置工作台步进速度为 1 mm/s，每次步进距离为 0.5 mm，将曝光干涉条纹记录在 ShipleyS1805 光刻胶上。曝光完成后，使用碱性溶液显影得到光栅掩模。使用 800 mm 口径的 Zygo 干涉仪测量了光栅利特罗入射下−1 级的衍射波前，如图 19(彩图见期刊电子版)所示，所制作光栅实物图如图 20 所示。

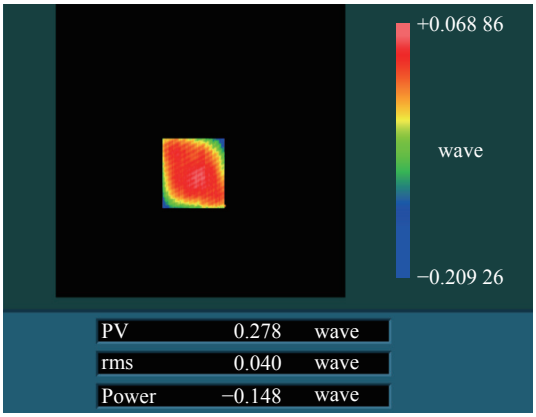

图 19 光栅衍射波前

Fig. 19 Grating diffraction wavefront

由图 19 可知，所制作光栅衍射波前为 0.278λ@632.8 nm，RMS 为 0.040λ@632.8 nm，此光栅基底面形为 0.130λ。根据文献 [30] 得出的衍射波前与刻线误差的关系可知，刻线误差小于 0.195λ，对应工作台测量误差为 123.40 nm，由此可知实现了高精度的光栅制作。剩余误差可能包括相位锁定子系统、波前测量子系统、周期测量子系统、运动台子系统以及后续显影、刻蚀等工艺造成的误差。这些误差会在后续的研究中进一步探讨。

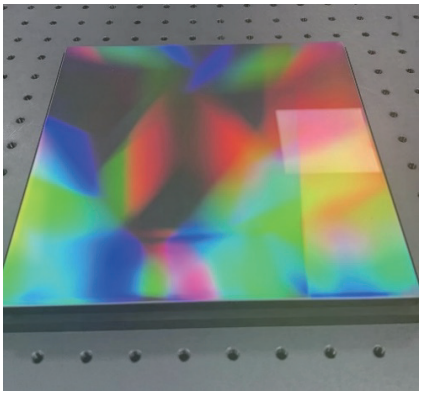

图 20 200 mm×200 mm×20 mm 光栅实物图

Fig. 20 Real picture of 200 mm×200 mm×20 mm grating

6 结 论

本文分析了激光干涉仪的本征误差。环境误差和工作台姿态误差对工作台测量精度的影响。经分析知由环境引起的测量误差是影响激光干涉仪测量精度的主要因素，因此在工作过程中需要严格控制环境参数。对于工作台姿态误差，可以在真实工况允许下，通过精密的光机结构设计进行控制。而对于测量镜面形误差，可以在精确测量面形后，利用网格划分进行误差补偿，这是下一步的工作重点。

对激光干涉仪进行误差分析后，结合扫描干涉场曝光系统，制作了口径为 200 mm×200 mm 的全息光栅，利用 Zygo 干涉仪测得其衍射波前为 0.278λ@632.8nm，计算得到刻线误差小于 0.195λ，实现了高精度的光栅制作。以上研究表明，本文的误差模型和误差分析方法可行，可为制作更大的米级尺寸纳米精度全息光栅提供理论和实验基础。

参考文献：

[1] 罗凯元, 郑文炜, 杨霖. 基于激光干涉的多轴运动平台垂直度测量[J]. 光学 精密工程, 2024, 32(17): 2654-2662.
LUO K Y, ZHENG W W, YANG L. Perpendicularity measurement of multi-axis motion platform based on laser interferometry[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(17): 2654-2662.

[2] 李星辉, 崔璨. 光栅干涉精密纳米测量技术[J]. 光学 精密工程, 2024, 32(17): 2591-2611.
LI X H, CUI C. Grating interferometric precision nanometric measurement technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(17): 2591-2611.

[3] 赵思霖, 穆全全, 李大禹. 基于液晶光栅的大视场红外凝视成像系统设计[J]. 光学 精密工程, 2024, 32(12): 1824-1835.
ZHAO S L, MU Q Q, LI D Y. A large field of view infrared staring imaging system based on liquid crystal grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(12): 1824-1835.

[4] HAN Y X, LI ZH Y, ZHANG Y B, *et al*.. 400nm ultra-broadband gratings for near-single-cycle 100 Petawatt lasers[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 3632.

[5] WANG R X, ANSARI M A, AHMED H, *et al*. . Compact multi-foci metalens spectrometer[J]. *Light*: *Science & Applications*, 2023, 12(1): 103.

[6] WANG Y F, XU X, DAI Z R, *et al*.. Frequency-swept feedback interferometry for noncooperative-target ranging with a stand-off distance of several hundred meters[J]. *PhotoniX*, 2022, 3(1): 21.

[7] LI Y B, JIANG SH, CHEN X SH, *et al*.. Accurate measurement and adjustment method for interference fringe direction in a scanning beam interference lithography system[J]. *Optics Express*, 2023, 31(17): 28145-28160.

[8] KONKOL 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.

[9] 王玮, 巴音贺希格, 宋莹, 等. 扫描干涉场曝光光束自动对准及其收敛性分析[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1205001.
WANG W, BAYANHESHIG, SONG Y, *et al*.. Beam alignment and convergence analysis of scanning beam interference lithography system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1205001. (in Chinese).

[10] 姜珊, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 扫描干涉场曝光系统中周期设定对曝光刻线相位的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0905003.
JIANG SH, BAYANHESHIG, LI W H, *et al*.. Effect of period setting value on printed phase in scanning beam interference lithography system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0905003. (in Chinese).

[11] CHEN C G. *Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: fabricating gratings with nanometer phase accuracy*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.

[12] 鲁森, 杨开明, 朱煜, 等. 用于扫描干涉场曝光的超精密微动台设计与控制[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012006.
LU S, YANG K M, ZHU Y, *et al*.. Design and control of ultra-precision fine positioning stage for scanning beam interference lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1012006. (in Chinese).

[13] 刘兆武, 李文昊, 王敬开, 等. 纳米精度二维工作台测量镜的面形误差在线检测[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(9): 2134-2141.
LIU ZH W, LI W H, WANG J K, *et al*.. Online detection of profile deviation for nano precision 2-D stage mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2134-2141. (in Chinese).

[14] LIU ZH W, YANG H, LI Y B, *et al*.. Active control technology of a diffraction grating wavefront by scanning beam interference lithography[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37066-37074.

[15] LIU ZH W, LI W H, BAYANHESHIG, *et al*.. Two-color heterodyne laser interferometry for long-distance stage measurement with correction of uncertainties in measured optical distances[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 8173.

[16] HORI Y, GONDA S, BITOU Y, *et al*.. Periodic error evaluation system for linear encoders using a homodyne laser interferometer with 10 picometer uncertainty[J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 388-392.

[17] YUAN G H, ZHELUDEV N I. Detecting nanometric displacements with optical ruler metrology[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 771-775.

[18] YIN Y F, LIU ZH W, JIANG SH, *et al*.. High-precision 2D grating displacement measurement system based on double-spatial heterodyne optical path interleaving[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 158: 107167.

[19] LV Q, LIU ZH W, WANG W, *et al*.. Fast method to detect and calculate displacement errors in a Littrow grating-based interferometer[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(12): 3193-3199.

[20] LIU L, LIU ZH W, JIANG SH, *et al*.. Polarization modulated grating interferometer by conical diffraction[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 689-699.

[21] BAI Y, HU P C, LU Y F, *et al*.. A six-axis heterodyne interferometer system for the joule balance[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(6): 1579-1585.

[22] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504001.
TAN Y D, XU X, ZHANG SH L. Precision measurement and applications of laser interferometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1504001. (in Chinese).

[23] 林荣炜, 程真英, 何亚雄, 等. XY 工作台六自由度误差在线测量和补偿[J]. 光学 精密工程, 2023, 31(12): 1761-1773.
LIN R W, CHENG ZH Y, HE Y X, *et al*.. On-line six-degree-of-freedom errors measurement and compensation for XY stages[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(12): 1761-1773. (in Chinese).

[24] 吴炳阳, 于晋龙, 王菊, 等. 小型化空气折射率测量装置的精度修正[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040102.
WU B Y, YU J L, WANG J, *et al*.. Accuracy correction of miniaturization device for air refractive index measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040102. (in Chinese).

[25] 宋磊. 光刻机工件台六自由度测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
SONG L. *Research on 6-degree-of-freedom measurement system of wafer stage*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese).

[26] 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: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014. (in Chinese).

[27] BIRCH K P, DOWNS M J. An updated Edlén equation for the refractive index of air[J]. *Metrologia*, 1993, 30(3): 155-162.

[28] 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.

[29] YANG Y, DENG Y, TAN Y D, *et al*.. Nonlinear error analysis and experimental measurement of Birefringence-Zeeman dual-frequency laser interferometer[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 264-268.

[30] YOKOZEKI S, SAWA S. Interferometric testing of gratings using moiré method[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1975, 14(S1): 465-470.

作者简介：

李文昊(1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 研究员, 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, 主要研究方向为平面、凹面全息光栅的理论设计及光栅精密位移测量技术。E-mail: liwh@ciomp.ac.cn

姜　珊(1988—), 女, 河北邯郸人, 博士, 2015 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, 主要从事全息曝光系统的研究。E-mail: jiangshan0122@126.com