

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.03.03

利特罗型光栅干涉仪的元件定位误差分析

赵金辉, 胡源*

(长春理工大学 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要: 针对利特罗型光栅干涉仪的系统误差研究缺少更深入的量化数据的问题, 对元件定位精度引起的利特罗型光栅干涉仪系统误差进行了研究, 即分析光栅绕 x 、 y 、 z 轴旋转以及反射镜绕 y 轴旋转时导致的额外光程差所造成的系统误差对干涉仪的位移测量影响。建立光栅及反射镜绕轴旋转时的光程差变化引起的相关误差的数学模型, 进行定量分析, 并通过实验验证该数学模型的准确性。结果表明: 光栅及反射镜绕 x 、 z 轴旋转时不会产生额外光程差; 光栅绕 y 轴旋转时会产生系统误差, 且误差会随着光栅常数和旋转角度的增大而增大; 反射镜绕 y 轴旋转时, 只有当两反射镜的旋转角度不同时才会产生误差, 且误差会随着两反射镜旋转角度的增大而增大。对整个系统进行误差合成后得到: 在高装配级别下, 未定系统误差为 $\pm 3.12 \mu\text{m}$; 在一般级别下, 未定系统误差为 $\pm 17.75 \mu\text{m}$ 。通过该实验验证了理论仿真的正确性, 为利特罗型光栅干涉仪的系统优化设计提供了技术参考与理论支持。

关键词: 光栅干涉仪; 利特罗型; 误差分析; 光程差; 精密位移测量

中图分类号: TB96; TH115; TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 03-0037-08

Element positioning error analysis of a Littrow grating interferometer

ZHAO Jinhui, HU Yuan*

(Key Laboratory of Opto-electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the lack of more in-depth quantitative data for the study of the systematic errors of Littrow-type grating interferometers, the systematic errors of Littrow-type grating interferometers caused by the positioning accuracy of the components, namely, the systematic errors of the interferometers caused by the additional optical path differences due to grating rotation around the x , y , and z axes as well as mirror rotation around the y axis, were investigated in terms of the impact of the systematic errors on the displacement measurements of the interferometers. A mathematical model of the error caused by the change in optical path difference when the grating and mirror rotate around the axes was established, quantitatively analyzed, and the accuracy of the mathematical model was verified by experiments. The results show that: when the grating and mirror rotate around the x and z axes, no additional optical path difference is generated; when the grating rotates around the y axis, the systematic error will be generated and increase with the increase of the grating constant and the rotation angle; when the mirror rotates around the y axis, the error will be generated only when the rotation angles of the two mirrors are different, and the error will increase with the increase of the rotation angle of the two mirrors. After synthesizing the errors of the whole system, the undefined system error is $\pm 3.12 \mu\text{m}$ in high assembly level, and

收稿日期: 2025-01-06; 修回日期: 2025-02-09

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20240101360JC)

引用格式: 赵金辉, 胡源. 利特罗型光栅干涉仪的元件定位误差分析[J]. 计测技术, 2025, 45(3): 37-44.

Citation: ZHAO J H, HU Y. Element positioning error analysis of a Littrow grating interferometer[J]. Metrol-ogy & Measurement Technology, 2025, 45(3): 37-44.



$\pm 17.75 \mu\text{m}$ in general level, which verifies the correctness of the theoretical simulation, and provides technical reference and theoretical support for the system design of the Littrow-type grating interferometer.

Key words: grating interferometer; Littrow type; error analysis; optical path difference; precision displacement measurements

0 引言

以光栅栅距为测量基准的光栅干涉仪^[1-4]凭借其高精度、高分辨力、大量程、小体积、低成本等优势在位移测量领域有着广泛的应用,其中,利特罗结构以抗干扰性强、结构稳定、容差高等特点,逐渐成为光栅干涉仪中的研究焦点。国际上已对光栅干涉仪进行了多方面的研究^[5-8],我国近年来也开展了多方面研究,例如,合肥工业大学、桂林电子科技大学等分别开展了入射式、利特罗式和八倍光学细分等结构的光栅干涉仪研究,探究了光栅、波片等系统误差对干涉条纹影响的表现及偏振状态对探测器信号的影响^[9-13];哈尔滨工业大学提出了一种空间分离式的光栅干涉仪等^[14]。

上述研究仅对干涉仪的随机误差进行了讨论,并对系统误差开展了一些初步研究,并未进行深入的数据仿真和误差等级评估。针对以上问题,本文对基于衍射原理设计的利特罗式光栅干涉仪的误差来源进行深入研究,探究因光栅、反射镜元件安装定位精度低而引起的系统误差,并建立了相应的数学模型,对误差进行仿真分析,评估其对干涉仪测量精度的影响,为光栅干涉精密测量领域的发展提供技术支撑。

1 利特罗型光栅干涉仪测量原理及数学模型建立

利特罗型光栅干涉仪的原理简图如图1所示。激光器(Laser, LS)发出的光束经过偏振分光镜(Polarizing Beam Splitter, PBS)分束后,光束 R_1 为平行偏振光透射,光束 R_2 为垂直偏振光反射,2光束分别经过1/4波片 Q_1 、 Q_2 后转变为圆偏振光。 R_1 光经反射镜 M_1 后以利特罗角入射至光栅 G 发生衍射,其-1级衍射光按 R_1 光路原路返回,依次经过 M_1 、 Q_1 ,最终被PBS反射后经过偏振片 P ; R_2 光路同理,被PBS透射后经过偏振片 P ,最终与 R_1 光路重叠,入射至探测器(Detector, DC)表面,形成干涉

条纹,被探测器所接收,进行光电处理后解算为位移变化。

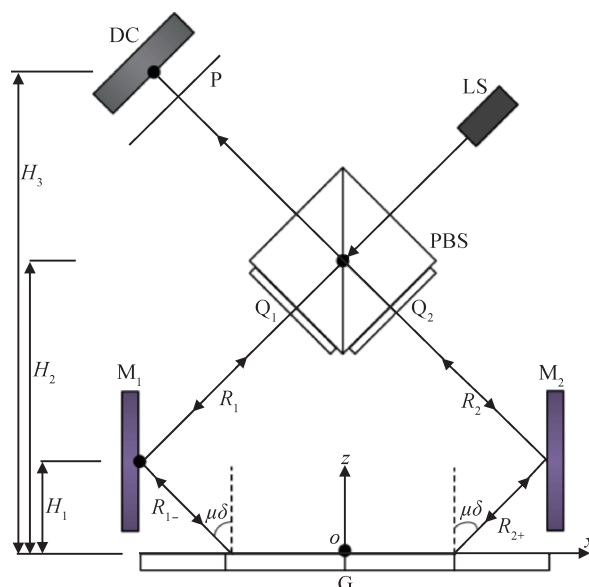


图1 光栅位移测量系统

Fig.1 Grating displacement measurement system

结合图1建立光栅干涉仪光路结构的坐标系,以光栅的中心 o 为坐标原点, x 轴为光栅平移方向, y 轴为刻线方向, z 轴为垂直方向。 M_1 中点到光栅的垂直距离为 H_1 , PBS中点到光栅的垂直距离为 H_2 , DC中点到光栅的垂直距离为 H_3 。

入射至探测器表面的两束光可以表示为^[1]

$$E_{1,2} = E_0 \cos(-\omega_{1,2}t + \phi_{1,2}) \quad (1)$$

式中: E_0 为2束光波的初始振幅, $E_{1,2}$ 为2束光波的电场强度矢量, $\omega_{1,2}$ 为2束光波的频率, $\phi_{1,2}$ 为2束光波的相位, t 为时间。

根据光的干涉原理,探测器所接收到的干涉信号为

$$I = 2E_0^2 + 2E_0^2 \cos(-\Delta\omega t + \Delta\phi) \cos(\rho) \quad (2)$$

式中: $\Delta\omega$ 为两光束的频差; $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$, $\Delta\phi$ 为干涉仪两光束光程差引起的系统误差项; ρ 为两光束与探测器表面的振动方向夹角。该系统误差是实际安装过程中由元件的定位偏差引起的,虽然

能够在干涉仪装配完成后通过标定去除,但是在系统总体设计及加工装调过程中会影响研制方案的确定,因此本文分析系统误差对光栅干涉仪的影响。

如图1所示,光栅入射角(利特罗角^[13]) μ 和衍射角 δ 满足光栅方程

$$\sin \mu + \sin \delta = \frac{m\lambda}{d} \quad (3)$$

式中: m 为衍射级数, λ 为激光波长, d 为光栅常数。利特罗结构存在 $\mu = \delta$ 的关系,因此,利特罗角为 $\mu = \arcsin(\lambda/2d)$,根据光栅多普勒效应^[1],理论情况下可以计算得到两衍射光束的频率差为

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = \frac{4\pi mv}{d} \quad (4)$$

式中: v 为光栅的位移速度。将频差代入式(2),可以得到

$$I \sim \cos\left(\frac{4\pi mv}{d}t\right) = \cos\left[4\pi m \frac{1}{d} \int_0^t v(t)dt\right] = \cos\left(\frac{4\pi mx}{d}\right) \quad (5)$$

由式(5)可知,位相转换公式为

$$\Delta\phi = 4\pi m \frac{x}{d} \quad (6)$$

由式(6)可知,当光栅运动使相位变化 2π 时,位移量等于二分之一的光栅常数。

2 定位误差引起的系统误差分析

在光栅干涉仪中,系统误差主要是由元件的安装定位误差造成的,而安装定位误差是相对的。因此,本文将分光棱镜固定,以光栅和反射镜的旋转引起的误差作为主要分析对象,开展相关研究。设光栅绕 x 、 y 、 z 轴的旋转角度分别为 α 、 β 、 γ ,反射镜绕 y 轴的旋转角度为 θ 。

2.1 光栅绕 x 轴旋转的影响

光栅绕 x 轴旋转,如图2所示。以 R_1 光路为例,当光栅绕 x 轴旋转 α 角时,衍射光线为 R_{1-} ,在三维空间上其偏转的方位角度为 2α ,衍射角度不变。将偏转后的光路展开,则干涉条纹在探测器DC上的偏移距离为 $\Delta a = b \tan 2\alpha$ (b 为入射点 A_1 至探测器中心的距离)。同理,另一段光路偏移距离与 R_1 光路相同,绕 x 轴的旋转角越大,偏离距离越大,且当两光路的偏移距离大于探测器表面直径的一半时,探测器将无法读取干涉条纹。

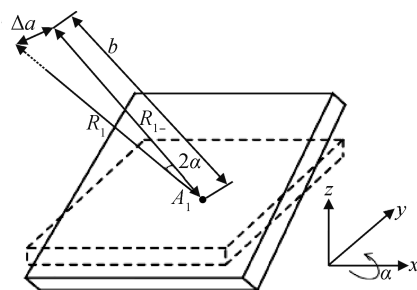


图2 光栅绕 x 轴旋转

Fig.2 Grating rotation around the x -axis

2.2 光栅绕 y 轴旋转的影响

光栅绕 y 轴旋转,如图3、图4所示。光栅的偏转使得利特罗入射条件被破坏,衍射光不能沿入射光原路返回,且2束光的入射角变化并不相同,即一上一下偏离,因此由它们额外产生的光

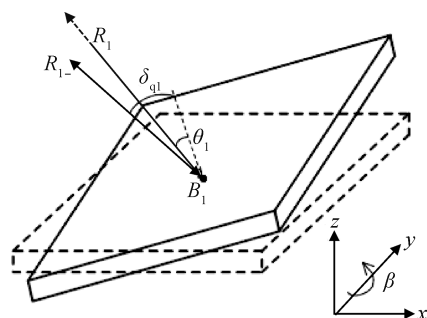


图3 光栅绕 y 轴旋转

Fig.3 Grating rotation around the y -axis

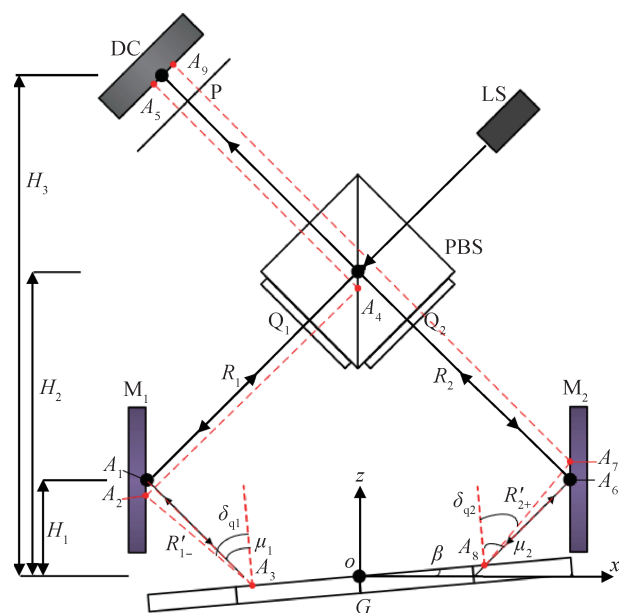


图4 光栅绕 y 轴旋转示意图

Fig.4 Schematic diagram of the rotation of grating around the y -axis

程差不能相互抵消。已知 H_1 、 H_2 、 H_3 、 β 的数值, 根据利特罗条件可得光束的入射角为 μ , 根据理论条件下的光路结构计算可得激光器 LS 发出的光束与 z 轴的夹角绝对值为 μ , 进而可得到 R_1 光束的斜率 k 为

$$k = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \mu\right) \quad (7)$$

根据已知 PBS 的中点 $(0, H_2)$ 可求出 R_1 光束的直线方程

$$y = kx + H_2 \quad (8)$$

代入 $y = H_1$ 可求出 A_1 点的坐标 $((H_1 - H_2)/k, H_1)$ 。将旋转后的光栅看作是经过原点的直线

$$y_2 = k_2 x \quad (9)$$

式中: $k_2 = \tan\beta$ 。根据反射原理可以得到 R_1 光束经过 M_1 后光束的角度, 即 $k_3 = \tan(\mu + \pi/2)$, 代入 A_1 点求出其直线方程为

$$y_3 = k_3 x + H_1 - k_3 \frac{H_1 - H_2}{k} \quad (10)$$

令 $y_2 = y_3$, 可得到光束入射至光栅上的横坐标 $a = \{H_1 - k_3[(H_1 - H_2)/k]\} / (k_2 - k_3)$, 代入式(9)求出纵坐标 $b = k_2 * a$, 即 $A_3(a, b)$; 同理可以求出 A_2 、 $A_4 \sim A_9$ 的坐标。求解出坐标点后, 根据勾股定理就能得到 R_1 和 R_2 两光路的光程, 两者相减即可得到绕 y 轴旋转的额外光程差 ΔL_y , 再代入式(6)就能得到其位移误差。

2.3 光栅绕 z 轴旋转的影响

光栅绕 z 轴旋转, 如图5所示。当光栅绕 z 轴旋转 γ 角时会产生余弦误差, 其与光栅绕 x 轴旋转时的情况相似, 不会产生额外的光程差, 因此光路结构仍是对称的, 但是光斑在探测器上的偏移方向不同, 绕 z 轴旋转会使得光斑上下分离。

虽然余弦误差不会产生额外光程差, 但光栅在移动过程中, 可以将光栅的旋转看作是光栅常

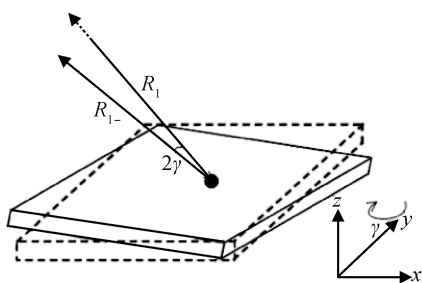


图5 光栅绕 z 轴旋转

Fig.5 Grating rotation around the z -axis

数发生了改变, 从而引起了干涉条纹的变化。光栅的旋转使得光栅常数变成了 $\Delta d = d / \cos\gamma$ 。由式(6)可知, $\Delta\varphi = 4\pi / \Delta d$, 即 $\Delta x = x - x \cos\gamma$, 位移测试误差为 $x(1 - \cos\gamma)$ 。

2.4 反射镜绕三轴旋转的影响

如图6、图7所示, 根据反射镜 M_1 和 M_2 摆放位置分析可知: 当反射镜绕 x 轴旋转时, 对光路并无影响; 当反射镜绕 z 轴旋转时, 与光栅绕 x 轴旋转情况相似, 光路会在空间上发生改变, 使得光线经过反射镜后的方位角发生变化, 对于干涉光斑的重合度产生影响; 当反射镜绕 y 轴旋转时, 入射光束无法以利特罗角入射, 使得光路结构发生变化, 产生额外的光程差。

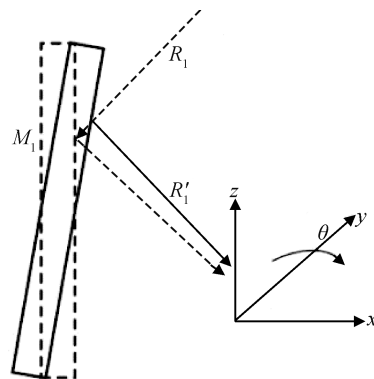


图6 反射镜绕 y 轴的旋转误差

Fig.6 Rotation error of the mirror about the y -axis

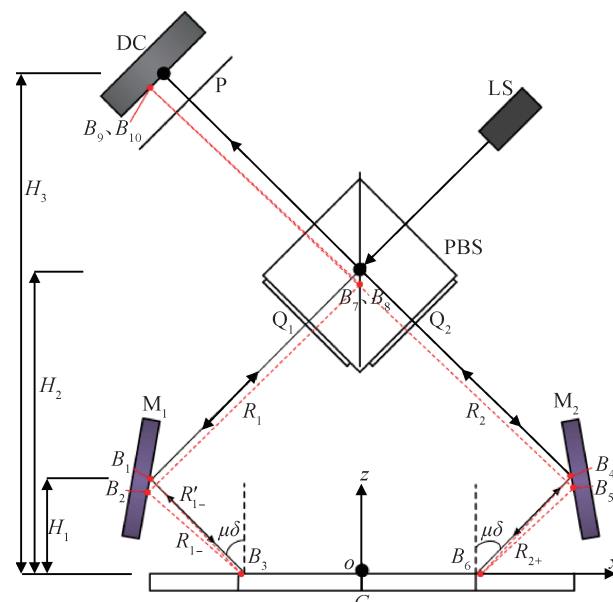


图7 反射镜绕 y 轴旋转示意图

Fig.7 Schematic diagram of the rotation of mirror around the y -axis

当 M_1 顺时针旋转时, 该镜所产生的反射光 R'_1 会顺时针偏转, 使得入射角变小, 衍射角变大, 由于光路的对称性, M_2 逆时针旋转时, 入射角和衍射角将产生相同的变化。位移测试误差的计算与 2.2 节的计算方式类似, 使用几何法计算即可得到两光路因旋转而产生的额外光程差 ΔL_y 。

2.5 系统误差合成分析

根据上述系统误差的分析可知: 光栅绕 x 轴和 z 轴的旋转会使得光斑偏移, 但不会导致额外光程差的出现; 光栅绕 y 轴的旋转会改变光束的入射位置, 因此会导致两路光束产生额外的光程差; 反射镜绕 y 轴的旋转则与光栅绕 y 轴的旋转相似, 会产生额外光程差; 而反射镜绕 x 、 z 轴旋转时不会产生额外光程差。

上文分析的误差都是随机产生的, 并不能准确掌握可能产生的具体旋转误差, 这符合未定系统误差的定义^[16]。考虑到各误差分项都具有随机性, 为了计算的简便, 采用随机误差 e 的合成公式来分析它们之间的相互关系。合成公式为

$$e = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i e_i)^2} \quad (11)$$

式中: e_i 为各项极限误差, a_i 为相应的误差传递函数。

综上所述, 取光栅绕 y 轴、 z 轴及反射镜绕 y 轴产生的测试误差来对整个干涉仪的系统测量精度进行评估。根据式(6)中的 $\Delta\varphi$ 可知各直接测量值与间接测量值, 再根据式(11)进行极限误差合成, 评估整个干涉仪的未定系统极限测试误差

$$e = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 e_1^2 + \left(\frac{4\pi \cos \gamma}{d}\right)^2 e_2^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 e_3^2} \quad (12)$$

式中: e_1 为光栅绕 y 轴旋转误差, e_2 为光栅绕 z 轴旋转误差, e_3 反射镜绕 y 轴旋转误差。

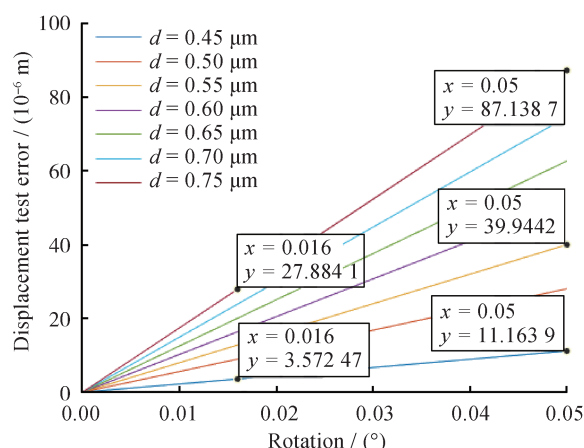
3 系统误差引起的干涉仪位移测试误差仿真分析

3.1 仿真分析

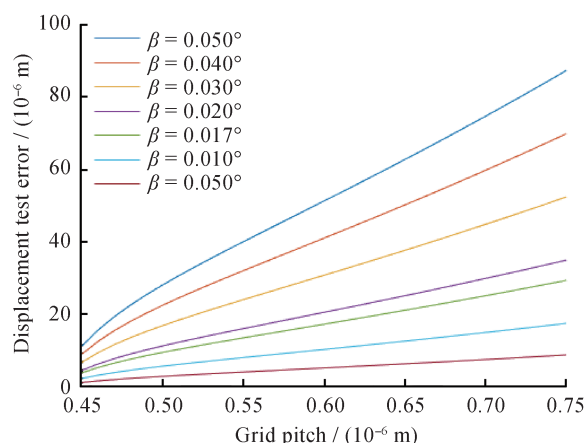
根据元件安装偏差引起的系统误差的数学建模, 本节开展干涉仪位移测量误差的数值仿真。以典型的轻小型光栅干涉仪的体积大小为例^[15], 仿真的具体数值为: 激光波长为 790 nm, 激光光束半径为 1 mm, H_1 为 12 mm、 H_2 为 30 mm、 H_3 为 48 mm, 位移距离为 10 mm。取光栅常数的区间为

0.45 ~ 0.75 μm 。

具体分析光栅的定位误差。当光栅绕 y 轴旋转时, 可以得到如图 8 所示的曲线图。从图 8(a)中可以看出, 在光栅常数 d 为较小值 0.45 μm 时, 位移测量误差的绝对值不超过 5 μm ; 但随着光栅常数增大, 误差也在增大; 在光栅常数为 0.75 μm 时, 位移测量误差达到几十微米量级。同时, 随着光栅常数增大, 曲线越发陡峭, 位移测量误差对旋转角度更加敏感。如图 8(b)所示, 固定光栅的角度旋转后, 位移测试误差随栅距变化的曲线并非完全呈线性, 在栅距较小的时候, 斜率相对较大。同时有类似于图 8(a)中的现象, 随着光栅旋转角度的增大, 位移测量误差对旋转误差更加敏感。



(a) 不同光栅常数 d 下, 位移测试误差随旋转角度的变化
(a) Variation of displacement test error with the rotation angle at different grating constants d



(b) 不同旋转角度 β 下, 位移测试误差随栅距的变化
(b) Variation of displacement test error with the grid spacing under different rotation angles β

图 8 光栅绕 y 轴旋转的位移测试误差

Fig.8 Displacement test error of grating rotating around the y -axis

当光栅绕 z 轴旋转时, 仿真结果如图9所示, 展示了在光栅绕 z 轴旋转时的不同旋转角度 γ 下, 位移测试误差随光栅运动距离的变化。从图9可以看出, 当给定光栅绕 z 轴的旋转角度时, 位移测试误差与待测位移长度(即横坐标, 光栅运动距离)有关, 光栅运动距离越大, 误差越大。同时, 光栅绕 z 轴旋转角度 γ 越大, 曲线斜率相对更陡, 位移测试误差对于角度的变化更加敏感。当仅存在光栅绕 z 轴旋转的位移测试误差且旋转角度为 0.05° 时, 误差数量级仅为 $10^{-3} \mu\text{m}$, 对干涉仪的测量精度的影响很小(相较于光栅绕 y 轴旋转)。

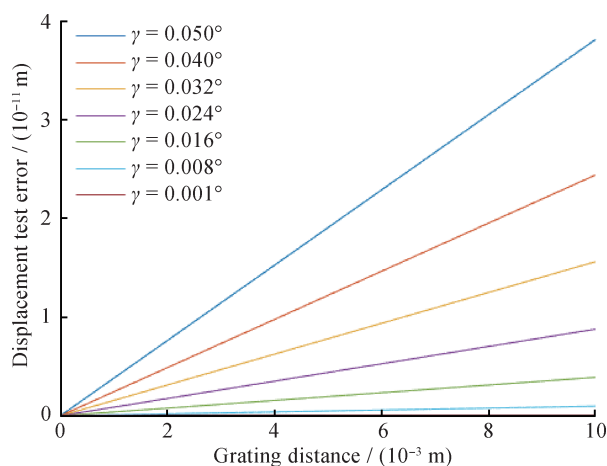


图9 光栅绕 z 轴旋转的位移测试误差

Fig.9 Displacement test error of grating rotating around the z -axis

最后, 分析反射镜绕 y 轴旋转时对位移测试误差的影响。为方便讨论, 假定固定1个反射镜旋转角度 θ , 让另一反射镜旋转角度在 $-0.05^\circ \sim 0.05^\circ$ 连续变化, 其结果如图10所示。从图10可以得知: 当两反射镜的旋转角度只有旋转方向不同时, 两光路对称, 无位移测试误差; 当旋转方向相同且旋转角度为 0.05° 时, 位移测试误差达到最大值, 两反射镜的正负旋转角度关于 0° 对称。同时, 位移测试误差的大小与两反射镜之间角度差异的绝对值有关, 其值越大, 误差越大, 二者之间关系呈线性变化。

综合上述内容, 根据式(12)以及不同的装配精度等级, 对光栅常数为 $0.55 \mu\text{m}$ 干涉仪的极限测量误差进行评估, 如表1所示。

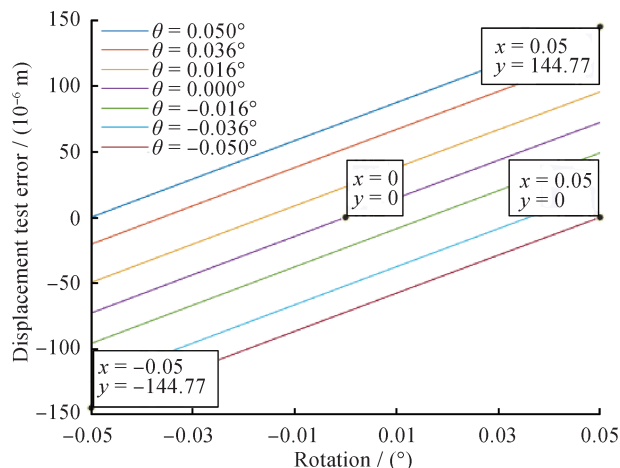


图10 反射镜绕 y 轴旋转位移测试误差

Fig.10 Displacement test error of mirror rotating around the y -axis

表1 各装配级别干涉仪的测量精度

Tab.1 Measurement accuracy of interferometers at each assembly level

Accuracy class	Angular tolerances	Interferometer precision / μm
High precision	$\pm 10''$	± 3.12
Medium precision	$\pm 30''$	± 8.39
General precision	$\pm 1'$	± 17.75

3.2 实验验证

取误差表现最明显的光栅旋转误差作为实验验证, 为了分离光栅旋时光束切割光栅由于多普勒频移效应和光程差导致的误差, 实验数据在光栅停止转动后进行测量。

搭建如图11所示的光路进行实验验证, 将得到的条纹信号通过示波器输出正弦信号, 根据其信号频率计算测试误差。实验搭建采用 $0.55 \mu\text{m}$ 的全息反射光栅、 $(790 \pm 5) \text{nm}$ 的半导体激光器、保护银反射镜、聚合物真零级1/4波片、二向色薄膜偏振片和宽带偏振分光棱镜。

将光栅绕 x 和 z 轴旋转时, 探测器在可探测的最小分辨力内信号频率无变化, 说明误差过小; 而当光栅绕其 y 轴旋转时, 随着旋转角度的增大, 信号频率也逐渐增大。根据频率转化相位公式和式(6)可以计算出光栅偏转后的位移误差, 从而得到如图12所示的曲线图。由于实际实验中存在信号噪声, 实验数据具有波动性, 因此每次实验读

取10组数据, 分别求出位移误差后经分析处理取均值, 进行曲线拟合后所得曲线的趋势与理论仿真的曲线基本吻合, 即随着光栅的旋转角度的增大, 位移测试误差也逐渐增大, 为上述的数学模型增加了可信度。

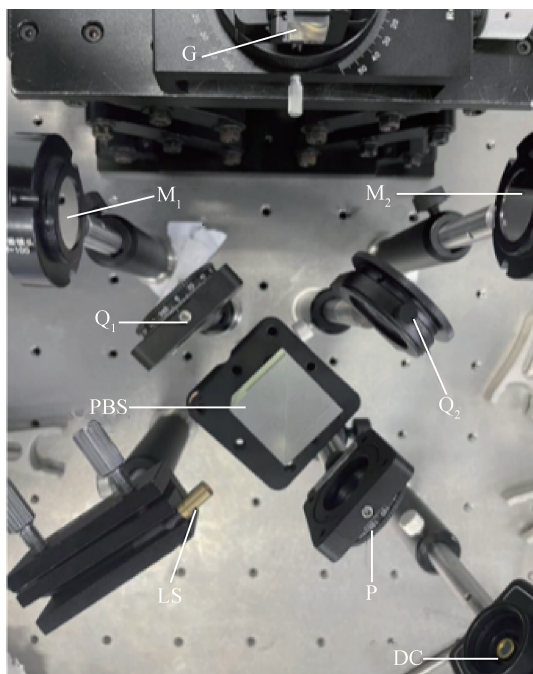


图11 实验光路

Fig.11 Experimental optical path

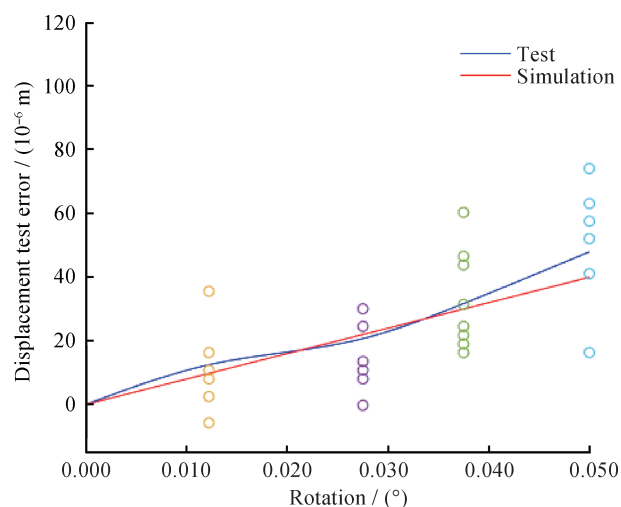


图12 理论与实验数据的比较

Fig.12 Comparison of theoretical and experimental data

4 结论

本文从理论方面分析了光栅绕 x 、 y 、 z 三轴旋转, 以及反射镜绕 y 轴旋转时的系统误差对于光栅

位移测量系统的影响, 为光栅位移测量系统的装配公差范围提供定量分析依据, 更清晰地指出了影响光栅干涉仪测量精度的主要因素。搭建实验光路进行了实验验证, 证明了上述理论研究的正确性。光栅绕 x 、 z 轴旋转对干涉仪光程差变化的影响可以忽略不计, 但会影响干涉光斑的重合度; 光栅和反射镜绕 y 轴的旋转, 会带来额外的光程差, 前者会随着光栅常数和角度的变大, 使得误差变化更加敏感; 后者对两反射镜之间的角度变化之差较为敏感, 角度之差越大, 误差越大。最后, 使用未定系统误差的合成公式评估在不同装配精度下整个干涉仪的未定系统误差值, 在高精度的装配级别下, 未定系统误差为 $\pm 3.12 \mu\text{m}$; 在一般精度的级别下, 未定系统误差为 $\pm 17.75 \mu\text{m}$, 且实验验证数据与仿真数据基本吻合, 二者之间的偏差为 $3.45 \mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 吕强. 基于衍射光栅的外差 Littrow 式精密位移测量系统关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
LYU Q. Study on key technology of heterodyne grating-based precision displacement measurement system with littrow structure[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [2] HU P C, ZHANG D, CHEN J B, et al. Displacement measuring grating interferometer: a review[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(5): 631-654.
- [3] 杨东兴. 小型化单光栅纳米级位移测量技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
YANG D X. Research on miniature single-grating displacement measuring technology with nanometer resolution [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [4] 刘林, 刘兆武, 于宏柱, 等. 大量程高性能光栅位移测量技术[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 81-90.
LIU L, LIU Z W, YU H Z, et al. Large range and high performance grating displacement measurement technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43 (1): 81-90. (in Chinese)
- [5] HEIDENHAIN. Exposed linear encoders[EB/OL]. <https://>

- www. heidenhain. com. cn/fileadmin/pdb/media/img/1172234-20_Exposed_linear_encoders. pdf.
- [6] GUAN J, PAUL K, CHRISTOPH W, et al. A high performance one-dimensional homodyne encoder and the proof of principle of a novel two-dimensional homodyne encoder [J]. Precision Engineering, 2013, 37(4): 865-870.
- [7] LAURYNŠ, GABOR M, RAINER K, et al. Multi-dimensional grating interferometer based on fibre-fed measurement heads arranged in Littrow configuration [C]// Measurement Science and Technology, 2018. DOI: 10.1088/1361-6501/aaa8b4.
- [8] 卢国纲. SONY 领先跨入皮米级检测和加工时代[J]. 现代制造, 2008 (12): 76-78.
LU G G. SONY has taken the lead in the era of picometer-level inspection and processing [J]. Modern Manufacturing, 2008 (12): 76-78. (in Chinese)
- [9] 刘玉圣. 高精度线性衍射光栅干涉仪系统的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
LIU Y S. Fabrication of Linear diffraction grating interferometer system with high accuracy [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 尚平. 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, 2012. (in Chinese)
- [11] FAN K C, LIU Y S, CHEN Y J, et al. A linear diffraction grating interferometer with high accuracy [C]// International Symposium on Precision Mechanical Measurements. International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [12] FAN K C, ZHANG Y L, MIAO J W, et al. Error compensation of grating interferometer due to angular error of linear stage [C]// IEEE. IEEE, 2012.
- [13] 康森. 光栅干涉仪位移测量系统的读头结构设计[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.
KANG S. Structure design of reading head for displacement measurement system of grating interferometer [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2023. (in Chinese)
- [14] XING X, CHANG D, HU P, et al. Spatially separated heterodyne grating interferometer for eliminating periodic nonlinear errors [J]. Optics Express, 2017, 25 (25): 31384-31393.
- [15] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 超精密外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2975-2985.
WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, et al. A displacement measurement system for ultra-precision heterodyne littrow grating interferometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(12): 2975-2985. (in Chinese)
- [16] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
FEI Y T. Error theory and data processing [M]. Beijing: China Machine Press, 2015. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 赵金辉(2000—), 男, 浙江嘉兴人, 主要从事光学测量、光学设计等领域的研究工作。



通信作者: 胡源(1981—), 女, 吉林长春人, 教授, 博士, 主要从事光学测量、光学设计及光学仪器开发等领域的研究工作。