

文章编号 1004-924X(2014)08-2039-08

基于单压电执行器的光栅刻线摆角修正

李晓天, 齐向东, 于海利, 高键翔, 冯树龙, 巴音贺希格*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:考虑机械刻划光栅刻线摆角对平面光栅衍射波前质量的影响, 本文根据光栅机械刻划过程的特点, 提出了一种单压电执行器调节方法。该方法可通过不断调节微定位工作台位移, 实时修正工作台摆角导致的光栅刻线摆角误差。首先, 推导出了微定位工作台位移实时修正公式。接着, 采用三路干涉仪实现了微定位工作台摆角测量及其主要成分分析。最后, 进行了光栅刻线摆角放大和校正实验。结果显示, 摆角放大和摆角校正实验已基本达到了预期的效果, 对光栅宽度为 10.4 mm 且刻线密度为 600 line/mm 的光栅进行修正后, 光栅刻线摆角比校正前降低了 64% 以上。这些结果表明: 采用单压电执行器方法对光栅刻线摆角进行实时修正可有效降低光栅刻线摆角, 提高光栅质量; 该方法可应用于大面积机械刻划光栅刻线摆角的修正。

关键词:平面光栅; 光栅刻线; 摆角修正; 衍射波前; 压电执行器

中图分类号: O436.1; TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142208.2039

Yaw angle correction of grating line based on single piezoelectric actuator

LI Xiao-tian, QI Xiang-dong, YU Hai-li, GAO Jian-xiang, FENG Shu-long, BAYANHESHIG*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: bayin888@sina.com

Abstract: As the yaw angle of a machine-ruling grating will decline its wavefront quality and influence grating performance and application level, this paper proposes a correction method of single piezoelectric actuator according to the characteristics of the grating machine-ruling process. The method adjusts continuously the displacement of a micro-positioning table to correct the yaw angle error of grating line. Firstly, a real-time displacement correction formula for the micro-positioning table was deduced. Then, the yaw angle of micro-positioning table was measured and analyzed by three interferometers and its main component. Finally, amplification and correction experiments of the yaw angle of grating line were performed. The results show that experiments have basically achieved the expected results. Comparing to the result before yaw angle correction, the corrected yaw angle of grating line for a grating with a width of 10.4 mm and linear density of 600 line/mm has reduced by 64% or more.

收稿日期: 2013-06-26; **修订日期:** 2013-08-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60478034); 国家创新方法工作专项资助项目 (No. 2008IM040700); 国家重大科研装备研制项目 (No. ZDY2008-1); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 11YQ120023); 吉林省重大科技攻关项目 (No. 09ZDGG005)。

It concludes that the single piezoelectric actuator approach to the yaw angle correction of grating line effectively reduces yaw angle of grating line and improves the quality of the grating. This method is applicable to the yaw angle correction of machine-ruling grating with a large area.

Key words: plane grating; grating line; yaw-angle correction; diffraction wavefront; piezoelectric actuator

1 引言

机械刻划法^[1]是制作光栅母版的主要方法之一,它利用光栅刻划机上的金刚石刻刀在光栅基底膜层上刻划出一系列具有一定形状的刻槽阵列来制作光栅。一般而言,光栅刻划机在机械结构上主要由刻划系统和分度系统组成。其中,刻划系统主要由刻划刀架、导向导轨和往复位移执行结构组成,往复位移执行结构用于驱动刻划刀架沿导向导轨做往复运动,从而带动刻划刀架上的金刚石刻刀运动;分度系统主要由单向位移执行结构、位移测量结构和工作台组成,单向位移执行结构用来驱动工作台做单向进给运动,从而实现光栅基底的进给操作。

光栅刻划机被称为“精密机械之王”,其机械结构极为复杂,而且对机械结构设计及运行精度的要求也极为严格。由于光栅刻划机的分度系统工作台在运动过程中受丝杠周期性误差、工作台运行不稳定和工作台导轨非直线性误差等的影响^[2-7],因此刻划出的光栅存在刻线摆角误差^[8]。机械刻划光栅的刻线摆角误差可直接导致光栅衍射波前质量下降并增大杂散光、卫线和鬼线的强度^[9],从而影响光栅的质量和用,如激光脉冲压缩光栅要求光栅刻线平直且衍射波前差小^[10]、精密光栅光谱仪器对光栅杂散光的要求较高^[11-12]等。此外,光栅刻线摆角误差对光栅性能的影响会随着光栅刻线长度的增加而增大,因此对大面积机械刻划光栅而言光栅刻线摆角误差的实时修正具有重要的意义。迄今为止,国外大刻划面积、高精度且高刻线密度的光栅刻划机,如美国 MIT-A 机、MIT-B 机、MIT-C 机^[1,4,9,13]和日本 Hitachi-4 刻划机^[7]等,大多实现了工作台摆角误差的实时修正功能。本文根据光栅机械刻划过程的特点,提出一种基于单压电执行器的光栅刻线摆角修正方法。该方法通过不断调节微定位工作台位移来实现由工作台摆角导致的光栅刻线摆角误差的实时修正。

2 单压电执行器式光栅刻线摆角修正原理

本文以长春光机所 2 号刻划机(以下简称为 2 号机)为例,对单压电执行器式光栅刻线摆角误差修正方法进行了介绍。2 号机工作台采用宏微两级工作台结构(见图 1),宏定位工作台和微定位工作台分别用于实现工作台的宏定位和微定位操作。如图 2 所示,单压电执行器式方法是在每条光栅刻线的刻划过程中,仅使用一个压电执行器根据激光干涉仪测得的微定位工作台的位移变化量来不断调整微定位工作台,使金刚石刻刀位置处的微定位工作台的理想位置 and 实际位置之间的位置误差趋于零。

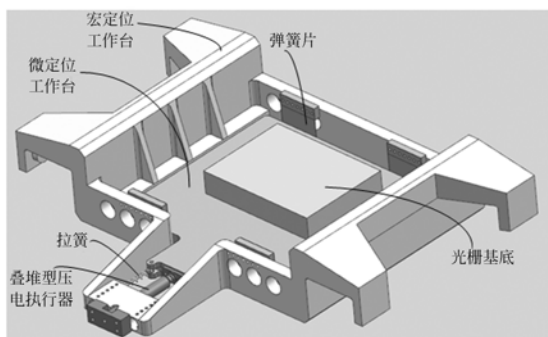


图 1 宏微两级定位工作台示意图

Fig. 1 Schematic of macro-micro combined positioning table

2 号机微定位工作台测量系统采用激光干涉仪实现,其中测量镜固定在微定位工作台上。如图 2 所示,设第 k 条理想刻线和实际刻线的夹角为 φ_k ,任意时刻 t , 金刚石刻刀的当前位置与落刀处(对应 $t=0$ 时刻)的距离为金刚石刻刀位移 s ,激光干涉仪测量光路的轴心线与金刚石刻刀落刀处的垂直距离为 d_L ,且光栅刻线长度为 L_g ,则有 $0 \leq s \leq L_g$ 。为了修正第 $n=k$ 条刻线的摆角修正,在该条刻线的刻划过程中微定位工作台位移主动

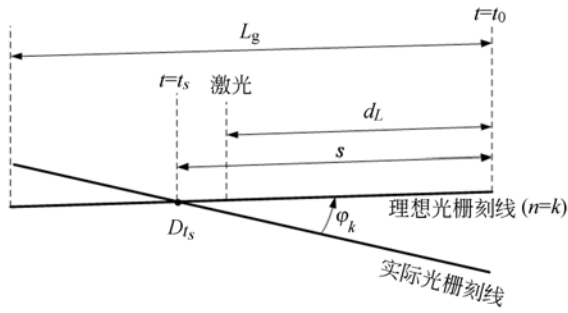


图 2 单压电执行器修正方法示意图

Fig. 2 Schematic of single PZT correction method

补偿量 $E(s)$ 与金刚石刻刀位移 s 之间的关系式可近似表达为:

$$E(s) \approx \tan(\varphi_k)(d_L - s). \quad (1)$$

由于在光栅刻划过程中金刚石刻刀做不等速运动,因此在修正光栅刻线摆角之前,需要先获得任意时刻 t_s 与该时刻的金刚石刻刀位移 s 之间的关系式。本文从 2 号机刻划系统的往复位移执行结构——曲柄连杆结构入手进行分析。如图 3 所示,点 O 对应曲柄中心位置,点 A 和点 B 分别代表连杆的两端,点 B 和点 C 代表推拉杆的两端,推拉杆与鞍型滑块直接连接,曲柄中心 O 与推拉杆 BC 不共线且设点 O 到 BC 的距离为 h_{BD} 。

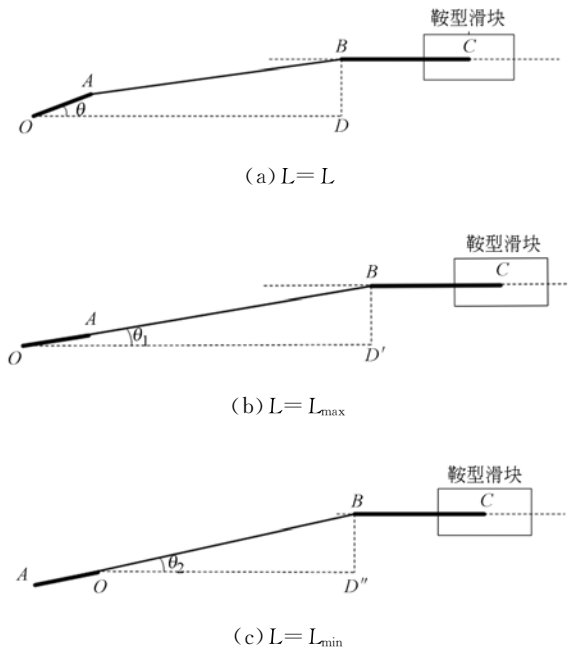


图 3 曲柄连杆原理示意图

Fig. 3 Schematic of crank-link principle

在图 3 中, BC 分别与 OD, OD', OD'' 平行,

$BD \perp OD, BD' \perp OD', BD'' \perp OD'', \angle AOD = \theta, \angle AOD' = \theta_1, \angle AOD'' = \theta_2$; 设 $OA = r, OD = L$, 则推拉杆与曲柄中心的距离 L 的最大值 $L_{\max}$ 和最小值 $L_{\min}$ 分别发生在连杆 OA 与线段 OB 之间的角度为 0° 和 360° 时(如图 3(b) 和 3(c) 所示), 此时 $L_{\max} = OD'$ 和 $L_{\min} = OD''$, 而且有:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arcsin\left(\frac{h_{BD}}{L_{AB} + r}\right) \\ \theta_2 = \arcsin\left(\frac{h_{BD}}{L_{AB} - r}\right) \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} L = r \cos \theta + \sqrt{L_{AB}^2 - (h_{BD} - r \sin \theta)^2} \\ L_{\max} - L_{\min} = L_g \end{cases}. \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得:

$$r = \frac{L_g}{2} \sqrt{\frac{4L_{AB}^2 - 4h_{BD}^2 - L_g^2}{4L_{AB}^2 - L_g^2}}. \quad (4)$$

若定义鞍形滑块位移 $s = L_{\max} - L$, 则有:

$$s = \sqrt{(r + L_{AB})^2 - h_{BD}^2} - r \cos \theta - \sqrt{L_{AB}^2 - (h_{BD} - r \sin \theta)^2}. \quad (5)$$

设曲柄的转动频率为 f_0 , 初始转动相位为零, 则曲柄转角 θ 与时间 t_s 的关系为:

$$\theta = 2\pi f_0 t_s. \quad (6)$$

联立式(5)和式(6), 可得鞍型滑块位移 s 与曲柄转动时间 t_s 的关系式为:

$$s = \sqrt{(r + L_{AB})^2 - h_{BD}^2} - r \cos(2\pi f_0 t_s) - \sqrt{L_{AB}^2 - (h_{BD} - r \sin(2\pi f_0 t_s))^2}. \quad (7)$$

当曲柄的转动速度不恒定时, 可通过采用位移传感器(如双频激光干涉仪等)直接获得鞍型滑块位移 s 与曲柄转动时间 t_s 的离散数据关系, 再采用 m 阶多项式拟合的方式, 得到 s 与 t_s 关系表达式的一般形式为:

$$s = \sum_{j=0}^m b_j t_s^j, \quad (8)$$

式中: b_j 为待定常数, 可通过实验数据确定。

式(7)也可用式(8)近似表达。将式(8)代入到式(1)即可获得任意时刻 t_s 微定位工作台位移主动补偿量 $E(t_s)$ 与时间 t_s 的关系式为:

$$E(t_s) \approx \tan(\varphi_k)(d_L - \sum_{j=0}^m b_j t_s^j). \quad (9)$$

设光栅常数为 d 且第 0 条刻线的微定位工作台位移量为 0, 则对于第 $n = k$ 条刻线而言, 微定位工作台具有的初始位移为 kd 。所以当对第 $n = k$ 条刻线进行刻划操作时, 若采用单压电执行器方法校正光栅刻线实时摆角, 则微定位工作台

任意时刻的位移量为:

$$D(t_s) = kd + E(t_s) \approx kd + \tan(\varphi_k)(d_L - \sum_{j=0}^m b_j t_s^j). \quad (10)$$

根据式(10),在刻划每条刻线过程中的任意时刻 t_s ,采用压电执行器对微定位工作台进行幅值为 $D(t_s)$ 的纳米定位操作,即可实现单压电执行器式光栅刻线摆角的误差修正。

3 微定位工作台摆角误差测量实验及分析

为了实现工作台摆角误差的测量及其准确性验证,本文采用 3 路双频激光干涉仪实时测量微定位工作台的位移,然后计算出微定位工作台在同一时刻不同位置的两组摆角误差值,通过比较这两组摆角值之间的差别(理想情况下两组摆角值应完全一致)来分析工作台摆角测量的准确性。图 4 给出了 3 路双频干涉仪(d_1 , d_2 和 d_3)及其测量镜(m_1 , m_2 和 m_3)的摆放位置。如图 4 所示,3 路干涉仪(参考镜集成在干涉仪内部)固定在主机组上,3 个测量镜固定于微定位工作台上。

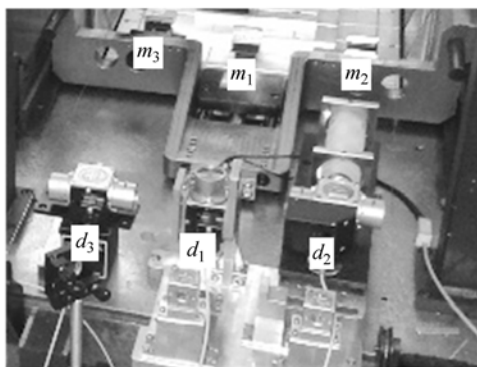
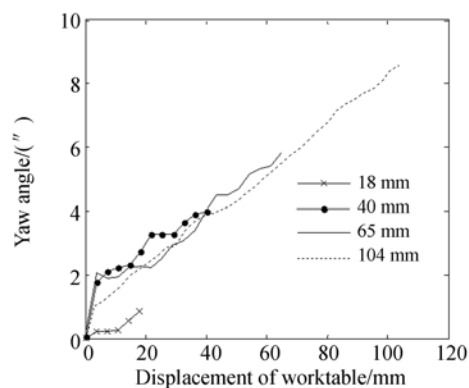


图 4 三路干涉仪位置示意图

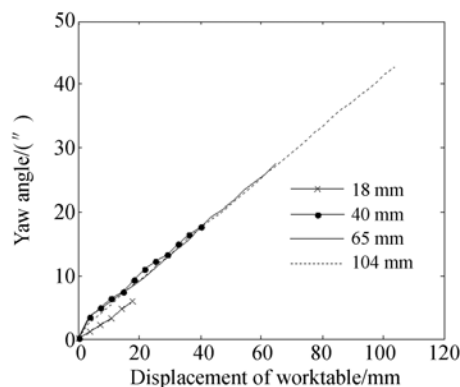
Fig. 4 Schematic of positions for three interferometers

首先以刻线密度为 60 line/mm 的模拟光栅刻划方式,使微定位工作台分别运动不同距离 D_i ,然后测量和计算微定位工作台在不同位置处的摆角。本文定义由干涉仪 d_1 和 d_3 计算得到的微定位工作台摆角为工作台左侧摆角,由干涉仪 d_1 和 d_2 计算得到的摆角为工作台右侧摆角。图 5 给出了当工作台运动距离 D_i 分别为 18, 40, 65 和 104 mm(共测量 4 次,每次工作台起始位置不



(a) 工作台左侧摆角

(a) Yaw angle of worktable's left side



(b) 工作台右侧摆角

(b) Yaw angle of worktable's right side

图 5 工作台摆角随其运动距离的变化曲线

Fig. 5 Yaw angle curves of worktable changing with its movement distance

同)时的摆角测量结果,横坐标表示工作台的运动距离,纵坐标表示工作台的摆角误差值。若去掉横坐标从 0~5 mm 内的摆角非线性区域,可发现 4 次工作台左侧(或右侧)摆角测量结果的斜率极为相似,但是却不相等。这是因为三路干涉仪的位移测量结果除了受到工作台摆角误差自身线性增大成份的影响外,还受到各自余弦测量误差的影响。

图 6 给出了 3 路干涉仪存在余弦误差的光路示意图。由于 3 个半反半透分光器件(p_1 , p_2 和 p_3)的摆放无法完全一致,导致入射到 3 路激光干涉仪(d_1 , d_2 和 d_3)的激光相互不平行,在任意两路激光的夹角很小时,可以证明这种影响将导致工作台左侧摆角和右侧摆角的测量值均存在与工作台运动距离呈近似线性变化的成分。这里需要注意的是,即使采用一路干涉仪进行摆角测量,在

进行光路对准时由于受到人眼分辨力及测量光路机械结构的限制,也可导致其测量结果受到余弦测量误差的影响。因此验证摆角测量结果的正确性是实现微定位工作台摆角误差修正的可靠保障。

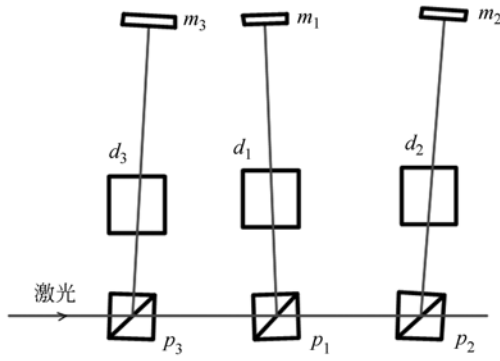


图6 存在余弦误差的干涉仪位置示意图

Fig. 6 Schematic of interferometer positions with cosine errors

图7为将工作台摆角误差测量结果中的线性趋势项去掉以后,工作台摆角误差随工作台运动距离变化的曲线。由图8可知,若去掉工作台摆角误差线性趋势项,工作台摆角误差随着工作台距离的变化而呈非线性变化,而且左侧摆角和右侧摆角在总体趋势上比较吻合,只是细节上略有

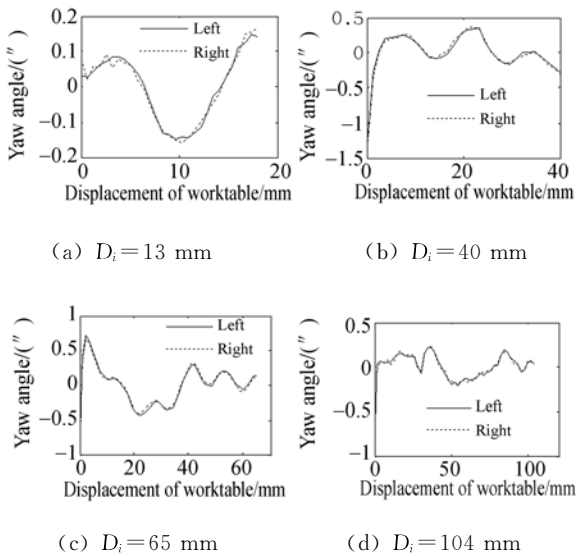


图7 去趋势项后工作台摆角随其运动距离变化曲线
Fig. 7 Yaw angles of worktable changing with its movement distance after removing trend term

差别。由于这种细节上的差别暂时无法分析其根源,此处将它归为摆角测量噪声。

综合分析图5~图7可知,工作台摆角误差的测量结果 γ 主要由线性成份、非线性成份 γ_1 和测量噪声 ϵ_1 等3部分组成。其中,线性成份主要由激光干涉仪余弦测量误差引起的摆角线性测量误差 ϵ_2 及工作台自身摆角的线性部分 γ_2 组成。因此工作台摆角误差测量结果 γ 可表达为:

$$\gamma \approx \gamma_1 + \gamma_2 + \epsilon_1 + \epsilon_2. \quad (11)$$

由式(11)可知,由双频激光干涉仪测量得到的工作台摆角误差测量结果 γ ,含有测量噪声 ϵ_1 和线性测量误差 ϵ_2 。本文采用多次测量取平均值的方式来降低测量噪声 ϵ_1 对摆角测量的影响,对于600 line/mm的光栅刻划而言,取当前刻线 k 的前4条刻线在刻划阶段的摆角测量结果(γ_{f1} , γ_{f2} , γ_{f3} 和 γ_{f4})的平均值为当前刻线摆角的平均结果 γ_{mk} ,可得:

$$\gamma_{mk} = (\gamma_{f1} + \gamma_{f2} + \gamma_{f3} + \gamma_{f4})/4. \quad (12)$$

然后介绍摆角线性测量误差 ϵ_2 的估算方法。由于 ϵ_2 和摆角自身线性成分 γ_2 是交叠在一起的,而且在未进行光栅刻划前,无法获得摆角线性成分 γ_2 的具体数值,因此可先假设 γ_2 为零。设微定位工作台运动距离 D_i 范围内工作台摆角测量结果的线性增加量为 φ_{D_i} ,若工作台从第 n_0 条刻线开始进行摆角修正,则在第 k 条刻线($k \geq n_0$)刻划期间,摆角线性测量误差 ϵ_2 可近似表达为:

$$\epsilon_2 \approx \frac{d(k - n_0 + 1)\varphi_{D_i}}{D_i}, \quad (13)$$

式中: d 为光栅常数。

设由式(12)计算得到的第 $n_0 - 1$ 条刻线的摆角平均结果为 $\gamma_{m(n_0-1)}$,则最终第 k 条刻线的摆角补偿值 φ_k 为:

$$\varphi_k = -(\gamma_{mk} - \gamma_{m(n_0-1)} - \epsilon_2). \quad (14)$$

将式(14)代入到式(10)中,可得刻划第 $n = k$ 条刻线时,微定位工作台的总位移量为:

$$D(t_s) \approx kd + \tan(-(\gamma_{mk} - \gamma_{m(n_0-1)} - \epsilon_2)) \cdot (d_L - \sum_{j=0}^m b_j t_s^j). \quad (15)$$

根据式(12)和式(15),通过实时测量微定位工作台的摆角误差,然后根据其测量结果实时调整微定位工作台位移,即可修正光栅刻划过程中微定位工作台的摆角误差。

4 光栅刻划机微定位工作台摆角误差修正实验

本文采用德国 jena 公司的型号为 PAHL 120/20 的压电执行器,该压电执行器的分辨率为 0.15 nm ,最大伸长量为 $120 \text{ }\mu\text{m}$ 。设光栅刻线的最大长度为 300 mm ,则该压电执行器所能调节的最大摆角值为 $120 \text{ }\mu\text{m}/300 \text{ mm}$ 的反正切值,即约为 $82.5''$ 。而实验测得的 2 号光栅刻划机工作台的最大摆角幅值小于 $0.7''$,因此该压电执行器能够满足 2 号刻划机摆角校正的使用需求。同时采用 BP 神经网络 PID 控制算法对压电执行器进行闭环控制,用以减少压电驱动器及工作台在长期运动过程中产生的非线性特性^[14-15]对光栅刻划机工作台纳米定位及光栅刻线摆角校正的影响。

为了验证单压电执行器式摆角修正方法,本文首先刻划出一块光栅宽度为 25 mm 且刻线密度为 600 line/mm 的光栅,然后再对 25 mm 区域的前面约 14.6 mm 进行了 1 倍摆角放大的光栅刻划实验(以下简称该光栅为摆角放大光栅),即取摆角补偿值为式(14)中 φ_k 值的相反数;对 25 mm 区域的后面约 10.4 mm 区域进行了摆角修正光栅刻划实验(以下简称该光栅为摆角修正光栅),即取摆角补偿值为式(14)中 φ_k 值。

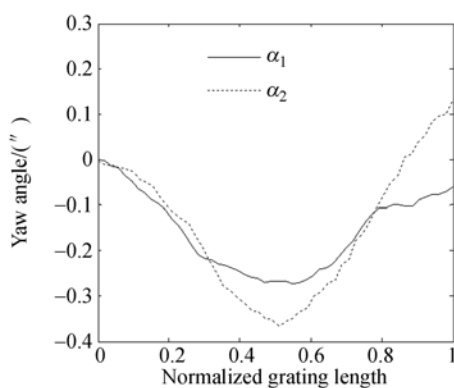


图 8 去倾斜前的摆角放大光栅摆角值与原始光栅摆角值
Fig. 8 Yaw angles of angle-zoom grating and original grating before removing tilt items

为了方便描述,以下简称未进行摆角放大或摆角修正的宽度为 25 mm 光栅为原始光栅。图 8 给出了摆角放大光栅的刻线统计平均摆角 α_2

与原始光栅对应区域光栅刻线的统计平均摆角 α_1 的对比曲线。统计平均摆角数据由 zygo 衍射波前测量仪间接获得,横坐标为归一化光栅宽度,纵坐标为统计平均摆角幅值。由图 8 可知,两条摆角曲线存在放大关系,但是二者的倾斜程度不同。图 9 给出了图 8 中两条摆角曲线去倾斜后的结果。由图 9 可知,去倾斜后的两次摆角在形状上比较相近而且在幅值上已接近 2 倍关系,原始光栅的统计平均摆角 PV 值约为 $0.24''$,摆角放大光栅的统计平均摆角 PV 值约为 $0.43''$,因此摆角放大光栅已基本实现了预期的摆角放大效果。

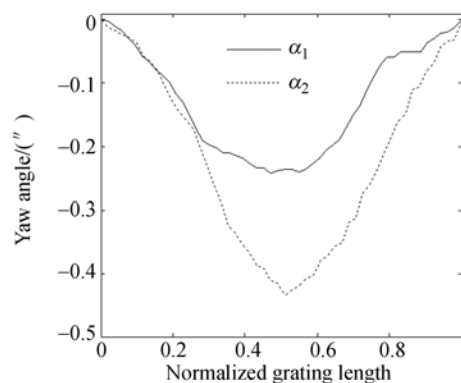


图 9 去倾斜后的摆角放大光栅摆角值与原始光栅摆角值
Fig. 9 Yaw angles of angle-zoom grating and original grating after removing tilt items

图 10 为摆角修正光栅与原始光栅对应区域光栅刻线的统计平均摆角的对比曲线。摆角修正前后的光栅刻线统计平均摆角的 PV 值分别约为 $0.39''$ 和 $0.14''$,修正后的光栅刻线摆角与修正前相比,降低了 64% 以上。图 11 为图 10 中两条摆

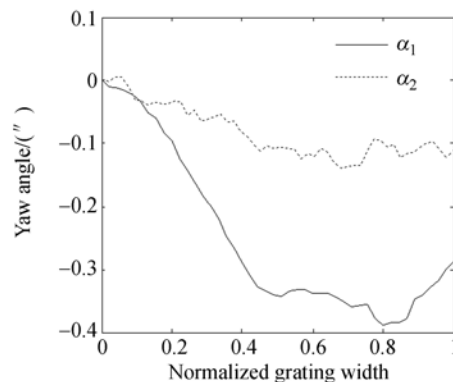


图 10 去倾斜前的摆角修正光栅摆角值与原始光栅摆角值
Fig. 10 Yaw angles of angle-correction grating and original grating before removing tilt items

角曲线去倾斜后的结果,此时摆角修正前后的统计平均摆角 PV 值分别约为 $0.2''$ 和 $0.07''$,修正后的统计平均摆角 PV 值约为修正前的 35%。

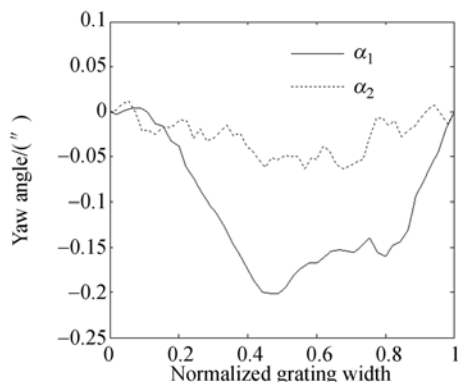


图 11 去倾斜后的摆角修正光栅摆角值与原始光栅摆角值

Fig. 11 Yaw angles of angle-correction grating and original grating after removing tilt items

参考文献:

- [1] 蔡锦达,王英,颜廷萌,等.衍射光栅刻划机的闭环控制系统[J].光学精密工程,2012,20(11):2416-2422.
CAI J D, WANG Y, YAN T M, *et al.*. Closed-loop control system for diffraction grating ruling machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (11): 2416-2422. (in Chinese)
- [2] 于海利.基于双频激光干涉测量的大行程纳米定位技术及其应用研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2011.
YU H L. *Research on large stroke nan-positioning technology and application based on dual-frequency laser interferometer* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [3] HARRISON G R, ARCHER J E. Interferometric calibration of precision screws and control of ruling engines[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1951, 8(41):495-503.
- [4] HARRISON G R, THOMPSON S W. Large diffraction gratings ruled on a commercial measuring machine controlled interferometrically[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, 60(5):591-595.
- [5] HARRISON G R, THOMPSON S, KAZUKONIS H, *et al.*. 750-mm ruling engine producing large gratings and echelles [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, 62(6):751-756.
- [6] BARTLETT I R, WILDY P C. Diffraction grating ruling engine with piezoelectric drive[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(1):1-3.
- [7] TOSHIKI K, TATSUO H. Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings [J]. *Applied Optics*, 1992, 31 (10): 1400.
- [8] STRONG J. New Johns Hopkins ruling engine[J]. *New York Meeting of the Optical Society of America*, 1951, 41:3-14.
- [9] HARRISON G R, STURGIS N. Interferometrically controlled ruling of ten-inch diffraction gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49 (3):205-211.
- [10] 徐向东,洪义麟,刘颖,等.超高强度激光脉冲压缩用衍射光栅[J].物理,2005,34(10):748-751.
XU X D, HONG Y L, LIU Y, *et al.*. Pulse compression gratings for ultrahigh power laser [J]. *Physics*, 2005, 34(10):748-751. (in Chinese)
- [11] 巴音贺希格,李燕,吴娜.紫外平面刻划光栅杂散光数值分析及测试[J].光学精密工程,2009,17(8):1783-1788.
BAYANHESHIG, LI Y, WU N. Numerical analysis and measurement of stray light from UV ruled gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (8): 1783-1788. (in Chinese)
- [12] PIERCE A K. Performance of an eight-inch babcock grating in a large vacuum spectrograph[J].

5 结 论

本文提出一种基于单压电执行器的光栅刻线摆角误差修正方法,同时采用三路干涉仪实现了光栅刻划机工作台摆角测量及其主要成分分析。最后,进行了光栅刻线摆角放大和修正实验。实验结果表明:(1)采用激光干涉仪测量工作台摆角时,由于测量光路摆放不理想,可导致摆角测量结果中存在线性测量误差,因此在进行光栅刻线摆角校正前,需对此进行补偿;(2)对光栅宽度为 10.4 mm 且刻线密度为 600 line/mm 的光栅进行摆角修正,修正后的光栅刻线摆角幅值与摆角修正前相比降低了 64% 以上。采用单压电执行器方法实时修正光栅刻线摆角,可有效降低光栅刻线的摆角误差,提高光栅质量。该方法有望应用于实时修正大面积机械刻划光栅的刻线摆角误差。

- Journal of the Optical Society of America*, 1957, 47(1): 6-14.
- [13] HARRISON G R. Techniques for ruling improved large diffraction gratings final report[R]. *Massachusetts Institute of Technology*, 1971: 1-14.
- [14] 刘泊, 郭建英, 孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(6): 1503-1509.
- LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1503-1509. (in Chinese)
- [15] 张栋, 张承进, 魏强, 等. 压电工作台的神经网络建模与控制[J]. *光学 精密工程*, 2013, 20(3): 587-594.
- ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q, *et al.*. Modeling and control of piezo-stage using neural networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 20(3): 587-594. (in Chinese)

作者简介:



李晓天(1981—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,助理研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2013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,主要从事衍射光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: lixt_1981@163.com



巴音贺希格(1962—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,博士生导师,2004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,主要从事光栅理论、光栅制作技术及光谱技术的研究。E-mail: bayin888@sina.com

(版权所有 未经许可 不得转载)