

文章编号 1004-924X(2018)03-0588-09

用于曲面光栅刻蚀的工作台轨迹拟合及测试误差分析

沈晨^{1,2}, 谭鑫^{1*}, 朱继伟¹, 张伟¹, 齐向东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 100049)

摘要: 制作高闪耀角一致性的曲面闪耀光栅需要工作台能够进行曲线拟合运动, 因此针对曲面闪耀光栅离子束刻蚀机三维工作台的控制算法开展研究。首先, 介绍了曲面闪耀光栅离子束刻蚀机三维工作台的原理方案。接着, 根据曲面刻蚀机的实际使用要求, 给出了工作台运动轨迹的理论计算方法。然后, 提出了一种适用于工作台的圆弧拟合算法, 实现了工作台所需的曲线拟合运动。最后, 在多组工作参数下开展了三维工作台运动轨迹的测量实验, 并将理想轨迹与实测轨迹进行了对比。实验结果表明: 工作台进行 15 个周期的直线拟合运动的累积定位误差小于 0.218 mm, 角度误差小于 0.02°; 进行 40 个周期的曲线拟合运动的累积定位误差小于 0.2 mm, 转角误差在 -0.2°~0.1°。此方法实现了三维运动工作台扫描刻蚀与摆动刻蚀的功能, 工作台的稳定性、精度、抗干扰能力满足设备使用要求。

关键词: 衍射光栅; 曲面闪耀光栅; 光栅刻蚀; 三维工作台; 圆弧拟合算法; 轨迹误差

中图分类号: O436.1; TP202.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0588

Trajectory-fitting and testing error analysis of stage for curved grating etching

SHEN Chen^{1,2}, TAN Xin^{1*}, ZHU Ji-wei¹, ZHANG Wei¹, QI Xiang-dong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: secele92@mail.ustc.edu.cn

Abstract: To manufacture curved surface gratings with highly consistent blazing angles, the curve-fitting motion of the three-dimensional (3D) stage is essential. Therefore, an investigation of the 3D stage was performed based on a control algorithm for the curved blazed grating etching system. First, a concept of the 3D stage of the curved blazed grating etching system was introduced. Subsequently, according to the actual requirement of the etching machine, the theoretical calculating method for the track of the stage was provided. Then, the arc-fitting algorithm of the stage was proposed and the curve-fitting motion of the stage was performed. Finally, the actual motion tracks of the 3D stage

收稿日期: 2017-09-13; 修订日期: 2017-11-24.

基金项目: 中国科学院重大科研装备研制项目 (No. YZ201005); 国家重大科学仪器设备开发专项资金资助项目 (No. 2011YQ120023)

were measured and compared with ideal tracks. Experimental results demonstrate that the cumulative positioning error of the linear fitting motion of the stage after 15 cycles is less than 0.218 mm, and the slope angle error is less than 0.02° ; the cumulative positioning error of the curve fitting motion of the stage after 40 cycles is less than 0.2 mm and the rotating angle error is in the range of $-0.2^\circ-0.1^\circ$. This method has realized the function of scanning etching and oscillating etching of the 3D stage. The stability, accuracy, and interference rejection of the stage satisfy the processing requirements.

Key words: diffraction grating; curved blazed grating; grating etching; 3D stage; arc fitting algorithm; track testing error

1 引言

衍射光栅^[1-3]是由规则排列的线、缝、槽、点阵构成的具有周期性空间结构的高分辨率色散光学元件,在现代光谱仪器中占有相当重要的地位。曲面闪耀光栅作为衍射光栅的一个种类,在材料科学、信息及生命科学、能源石化、卫生医疗、宇宙探索、卫星遥感、资源和天文探测等领域扮演着关键角色^[4-9]。目前,国际上曲面闪耀光栅的设计与制作工艺比较成熟,广泛地运用于摄谱仪、扫描单色仪、直读光谱仪、同位素光谱分析仪、成像光谱仪等仪器上^[10-14]。相对而言,我国对曲面闪耀全息光栅的研究才刚刚起步,其制作工艺水平有待提高。传统平动扫描离子束刻蚀的曲面光栅槽形整体一致性差,无法实现高衍射效率,为此亟需研制出能够进行摆动离子束刻蚀的曲面闪耀光栅刻蚀机,用来制作高闪耀角一致性的曲面闪耀光栅。

工作台系统是安装刻蚀试件的基准平台,是基底扫描离子束运动和摆动运动进行持续动态刻蚀的载体,是实现曲面闪耀光栅刻蚀的基础。传统的二维和三维工作台^[15-18]在精密工程领域应用十分广泛,但不能满足曲面闪耀光栅刻蚀机的特殊要求,因此国内仍亟需研制适用于曲面闪耀光栅刻蚀机的三维工作台。该三维工作台的研发关键在于如何在真空环境下保证频繁的高精度往复曲线运动,以保证曲面光栅闪耀角的一致性。工作台本身的机构能够进行两维直线运动与一维转动,因此需要通过三维运动拟合才能使光栅基底形成摆动。圆弧拟合算法^[19-21]能够实现工作台所需的曲线运动。相对于线性拟合算法,圆弧拟合算法的运动轨迹曲线光滑,稳定性、收敛性较好。由于离子束刻蚀自身工艺的原因,工作台的

运动精度要求不高,但离子束入射角的调节精度、摆动半径的调节精度要求较高;三维工作台的摆角定位精度要达到 $\pm 0.3^\circ$ 。

本文针对曲面闪耀光栅刻蚀机摆动刻蚀的需求,介绍了三维运动工作台的原理方案,对工作台的运动轨迹进行了理论计算,提出了基于三维旋转工作台的圆弧拟合算法,并实现了工作台的曲线拟合运动,满足曲面闪耀光栅刻蚀中三维工作台对运动轨迹、拟合运动精度以及稳定性、可靠性的要求。

2 曲面刻蚀机三维工作台原理

图1所示为曲面光栅刻蚀机三维运动工作台。工作台及其传动系统主要包括内部布有冷却水槽的L形立式工作台、X-Y二维滑台和 θ 轴水平旋转台、刚性中间层及其运动驱动系统。工作

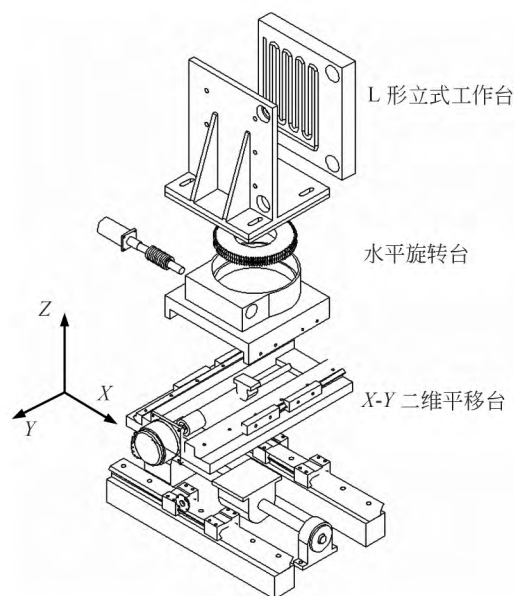


图1 三维工作台示意图

Fig. 1 Scheme of 3-D stage

台主体和离子源均放置于刻蚀机真空室内部。

三维运动工作台既具有实现平面光栅扫描刻蚀的扫描功能,又具有实现曲面闪耀光栅摆动刻蚀的摆动功能。在此基础上,平面光栅扫描刻蚀时的离子束入射角度、工作台靶源距、曲面光栅摆动刻蚀时的摆动半径均要可调。因此,工作台应具有五层结构。

2.1 坐标系建立

曲面刻蚀机主要制作平面、凸面和凹面三种光栅。在刻蚀开始阶段应该对其初始位置进行计算,以便工作台自动运动到初始位置。为便于计算,针对光栅运动平面建立如图 2 所示坐标系。

图 2 中 X 轴正方向指向真空室门,工作台向 X 轴正方向运动规定为 Pos 方向,向 X 轴负方向运动规定为 Neg 方向; Y 轴正方向为离子束入射方向,工作台向 Y 轴正方向运动规定为 Neg 方向,向 Y 轴负方向运动规定为 Pos 方向。当 Y 轴运动到 Neg 方向霍尔开关位置时,规定此时工作台沿 X 轴运动轨迹与离子束入射轨迹的交点为坐标系原点。各象限按逆时针排序,如图 2 所示。工作台的运动轨迹集中在坐标系的第 II、III 象限。

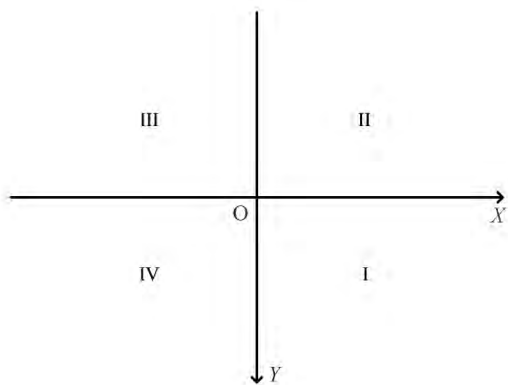


图 2 光栅运动坐标系

Fig. 2 Rectangular coordinate system of motion

2.2 刻蚀凸面光栅工作台运动轨迹理论计算

凸面光栅刻蚀示意图如图 3 所示。凸面光栅表面圆弧 BC 角度为 θ_{grating} ,凸面光栅的曲率半径为 R ,束流挡板的曲率半径为 R_1 ,凸面光栅长度为 L 、厚度为 d ,垫块厚度为 d_3 ;挡板吊装中心距坐标系原点距离设为 Y_{initia} ,靶源距为 d_2 ,挡板束缝宽度为 d_1 ,刻蚀入射角度为 θ ;工作台旋转轴的初始角度为 θ_{init} ;工作台初始位置或装样品位置即

A 点在 X 轴方向距原点距离为 X_{initia} ; O_1 点为刻蚀开始凸面光栅和束流挡板的圆心位置, A_1 点为待刻蚀位置工作台中心, 线段 O_1E_1 垂直于工作台表面并把圆心角 θ_{grating} 二等分。

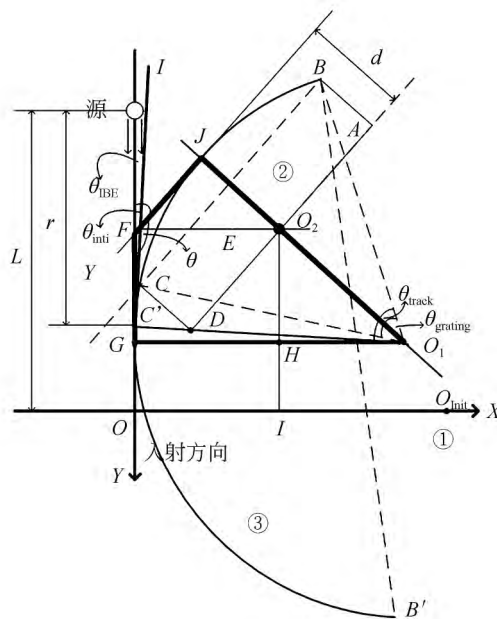


图 3 凸面光栅刻蚀示意图

Fig. 3 Schematic diagram of convex grating etching

轨迹圆心 O_1 坐标为:

$$(O_1F, OF) = (R \cos \theta, Y_{\text{initia}} - \sqrt{R_1^2 - (R \cos \theta)^2}), \quad (1)$$

$$\theta_{\text{grating}} = 2 \arcsin\left(\frac{L}{2R}\right). \quad (2)$$

刻蚀凸面光栅时,工作台首先由初始位置①运动到待刻蚀位置②,即有:

$$\Delta X = X_{A_1} - X_A = -[X_{\text{initia}} - R \cos \theta + (R - d - d_3) \cos(\theta + \theta_1 + \frac{1}{2}\theta_{\text{grating}})], \quad (3)$$

$$\Delta Y = Y_{A_1} - Y_A = Y_{\text{initia}} - \sqrt{R_1^2 - (R \cos \theta)^2} + (R - d - d_3) \sin(\theta + \theta_1 + \frac{1}{2}\theta_{\text{grating}}). \quad (4)$$

工作台旋转角度为:

$$\Delta \theta = \frac{\pi}{2} - \left(\theta + \theta_1 + \frac{1}{2}\theta_{\text{grating}}\right). \quad (5)$$

然后在②与③之间做往复运动,此时进行摆动扫描刻蚀,扫描运动范围为:

$$\theta_{\text{track}} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_{\text{grating}}. \quad (6)$$

刻蚀完成后再复位至①。

图中 CI 为凸面光栅半径 O_1C 的切线,所以

有 $CI \perp O_1C$ 。过 O_1 做 Y 轴垂线交 Y 轴于 G 点, 可以求出坐标系内凸面光栅圆心的 X 轴坐标为:

$$|O_1G| = R \cos \theta_{IBE}. \quad (7)$$

坐标系内凸面光栅圆心的 Y 轴坐标为 $|OG| = |OC| - |GC|$, 其中 $|OC| = L - r$, $|GC| = R \sin \theta_{IBE}$, 所以 Y 轴的坐标为:

$$|OG| = L - r - R \sin \theta_{IBE}. \quad (8)$$

在图中可以看出 O_2 的 X 轴坐标为:

$$|GH| = |O_1G| - |O_1H|. \quad (9)$$

$|O_1H|$ 为直角 $\triangle O_1O_2H$ 的一条直角边, 即:

$$|O_1H| = |O_1O_2| \cos \angle JO_1G, \quad (10)$$

其中 $|O_1O_2| = R - d$ 。

通过分析可以看出:

$$\begin{aligned} \angle JO_1G &= \angle JO_1C' + \angle C'O_1G = \\ &\theta_{track} - \frac{1}{2}\theta_{grating} + \theta_{IBE}. \end{aligned} \quad (11)$$

通过式(10)~式(11)可以求得:

$$|O_1H| = (R - d) \cos \left(\theta_{IBE} + \theta_{track} - \frac{1}{2}\theta_{grating} \right). \quad (12)$$

根据式(7)~式(10)可以求得 O_2 的 X 轴坐标表达式为:

$$\begin{aligned} |GH| &= R \cos \theta_{IBE} - \\ &(R - d) \cos \left(\theta_{IBE} + \theta_{track} - \frac{1}{2}\theta_{grating} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

所以通过工作台在 X 轴由初始位置运动到刻蚀开始位置的运动距离为:

$$\begin{aligned} |IO_{init}| &= Length_{X_{initia}} - R \cos \theta_{IBE} + \\ &(R - d) \cos \left(\theta_{IBE} + \theta_{track} - \frac{1}{2}\theta_{grating} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

对于 O_2 点 Y 轴坐标, 由图可以看出:

$$|IO_2| = |IH| + |HO_2|, \quad (15)$$

其中 $|IH| = |OG|$ 为 O_1 点的 Y 轴坐标,

$$|O_2H| = (R - d) \sin \left(\theta_{IBE} + \theta_{track} - \frac{1}{2}\theta_{grating} \right). \quad (16)$$

根据式(8)、式(14)和式(15)可以得到 O_2 点的 Y 轴坐标为:

$$\begin{aligned} |IO_2| &= L - r - R \sin \theta_{IBE} + \\ &(R - d) \sin \left(\theta_{IBE} + \theta_{track} - \frac{1}{2}\theta_{grating} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

对于刻蚀位置工作台转动角度 θ_{init} , 通过几何分析可以看出它与 θ 角 (θ 为 J 点的切线与 Y 轴所成角度) 互补, 在图中所强调的四边形中根据

其内角关系, 可以看出 θ 角与 $\angle JO_1G$ 互补。根据角 θ_{init} 、 θ 、 $\angle JO_1G$ 之间的关系可以得出 $\angle JO_1G = \theta_{init}$, 而式(11)即可求得 θ_{init} 的表达式:

$$\theta_{init} = \theta_{IBE} + \theta_{track} - \frac{1}{2}\theta_{grating}. \quad (18)$$

通过式(14)、式(17)和式(18)即可确定工作台从初始位置到刻蚀开始位置所需的运动距离。对于初始位置运动方向可以看出, 在 X 轴运动方向为 Neg, Y 轴为 Pos, θ 轴运动方向为逆时针。

刻蚀平面光栅和凹面光栅时, 工作台运动轨迹的理论计算与凸面光栅类似, 在此不做赘述。

3 三维运动工作台轨迹拟合算法

3.1 轨迹拟合初始条件规定

工作台需要完成三种运动轨迹拟合: 恒定相对入射角直线拟合运动、恒定相对入射角圆弧拟合运动、变相对入射角恒定曲率半径圆弧拟合运动。其中, 相对入射角的规定如下: 当 θ 轴处于初始位置时, 以过 θ 轴旋转运动中心的离子束入射方向为中心线为 Y 轴, 过 θ 轴旋转运动中心做 Y 轴垂线并作为 X 轴建立坐标系, 如图4所示。

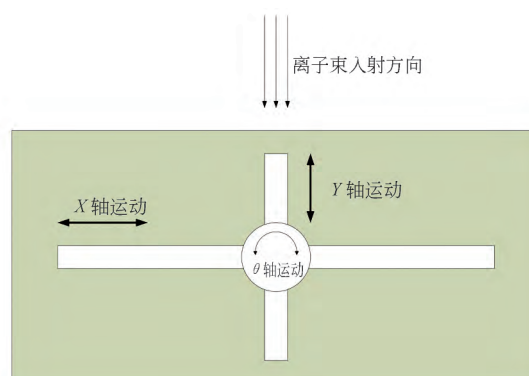


图4 以 θ 轴涡轮中心为原点建立的坐标系

Fig. 4 Coordinate system with turbine's center as its origin

恒定相对入射角直线拟合运动是为满足刻蚀平面光栅设计的, 其相对入射角的定义为: 在图2所定义的直角坐标系内以平面光栅垂直于 Y 轴为初始位置, 当 θ 轴顺时针旋转时平面光栅法线与 Y 轴所成锐角称作平面光栅刻蚀过程中的相对入射角, 记为 α 。如图5所示。

圆弧拟合运动中相对入射角的定义为: 假设

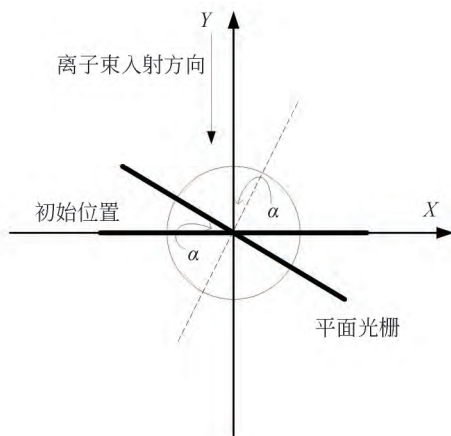


图 5 直线拟合运动相对入射角

Fig. 5 Relative incident angle of linear fitting motion

过曲面光栅两端点的平面为曲面光栅平面,在图 6 的直角坐标系中以曲面光栅平面垂直于 Y 轴的位置为初始位置,当 θ 轴顺时针旋转时过曲面光栅圆心的平面法线与 Y 轴所成锐角称做曲面光栅刻蚀过程中的相对入射角,记为 β 。

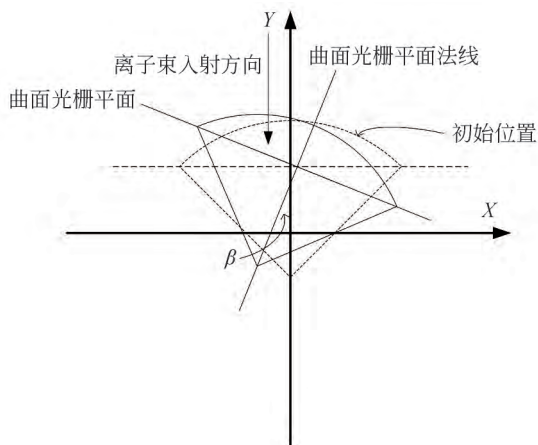


图 6 圆弧拟合运动相对入射角

Fig. 6 Relative incident angle of circular fitting motion

3.2 直线轨迹拟合

直线轨迹主要由 X 轴、Y 轴运动合成,且其拟合轨迹角度需要与相对入射角保持一致。将运动轨迹分为 n 等份,每一等份在 X、Y 轴方向运动的距离具有如下关系:

$$\tan \alpha = \frac{y}{x}, \quad (19)$$

其中 α 为相对入射角。只要 n 取得足够大,根据 X、Y 轴传动链的实现能力就可以获得足够精度的拟合运动轨迹。

计算拟合数据时,由于平面光栅长度 L 、相对入射角 α 、等分数 n 均为已知,因此可以计算出每一等份情况下,工作台在 X、Y 轴的运动距离并将其转化为步进电机的运动脉冲个数发送给运动控制模块。考虑实际刻蚀过程中,平面光栅需要往复运动多次,因此在进行数据传送时,数据包应该包含相对入射角度及旋转方向、双向往复次数、单方向运动轨迹拟合次数、每次拟合工作台在 X、Y 轴方向运动脉冲个数及方向等信息。

3.3 圆弧轨迹拟合

由于所采用的工作台结构无法实现平滑的圆周运动轨迹拟合,但当 n 足够大时,圆的正内接 n 边形将无限接近于圆周,而且内接多边形的各边均为直线可以通过 X-Y 运动合成,并通过 θ 轴调整角度误差,可以使工作台在一定的误差范围内实现近似于圆的运动轨迹。其运动轨迹拟合过程如图 7 所示,将圆 O_1 上半圆代表所要拟合的运动轨迹,其中 O_1 为曲面光栅圆心, O_5 为涡轮圆心;将圆 O_1 上半圆做 6 等分,等分点为 $A_{11}, A_{12}, A_{13}, A_{14}, A_{15}$ 。拟合运动的初始条件为:以圆 O_1 的圆心为坐标点构建直角坐标系;运动过程为顺时针顺序运动;圆 O_1 半径(曲面光栅曲率半径) $r_1 = 300$,圆 O_5 半径(涡轮半径) $r_2 = 120$,线段 $O_1 O_5$ 长度为 $O_1 O_5 = 100$ 。每一次拟合运动过程的目的是使前后两个割线重合。下面以割线 $A_{16} A_{15}$, $A_{15} A_{14}$ 为例说明运动轨迹拟合的过程,主要分为

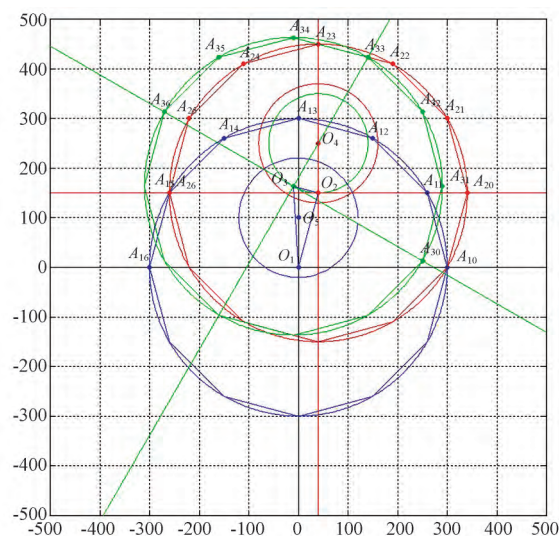


图 7 圆弧拟合算法

Fig. 7 Arc fitting algorithm

以下几个步骤:

(1) 使点 A_{16} 沿圆 O_1 的割线 $A_{16}A_{15}$ 运动, 使 A_{16} 与 A_{15} 重合。工作台通过 X 、 Y 轴运动量即圆心 O_1 的变化量, 为点 A_{16} 与 A_{15} 坐标点的差值:

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= x_{A_{15}} - x_{A_{16}}, \\ \Delta y_1 &= y_{A_{15}} - y_{A_{16}}\end{aligned}\quad (20)$$

其中 A_{16} 与 A_{15} 的坐标分别为:

$$A_{16} \left(r_1 \cos\left(\frac{5}{6}\pi\right), r_1 \sin\left(\frac{5}{6}\pi\right) \right),$$

$$A_{15} \left(r_1 \cos\left(\frac{6}{6}\pi\right), r_1 \sin\left(\frac{6}{6}\pi\right) \right).$$

则圆心 O_1 的变化量为: $\Delta x_1 = 40.1924$ 、 $\Delta y_1 = 150$, O_1 此时的位置在图 7 中为红色。此时圆 O_1 及涡轮圆心 O_5 的位置为 O_2 和 O_4 , 此时圆 O_2 的坐标均变为 A_{2n} 。分析红色圆的位置可以看出, 虽然 A_{16} 已经运动到 A_{15} 的位置, 但要使割线 $A_{15}A_{14}$ 与 $A_{16}A_{15}$ 重合, 在角度和位置上都需要做调整。

(2) 针对第一步调整时出现的角度误差, 涡轮旋转调整割线 $A_{15}A_{14}$ 与 $A_{16}A_{15}$ 的角度误差。调整量为割线所对的圆心角即 $\pi/6$, 调整后圆心位置为 O_3 。通过图 7 可以看出, 经过角度调整后割线 $A_{15}A_{14}$ 与 $A_{36}A_{35}$ 是平行的, 要使两割线重合只需要使圆心 O_3 运动到坐标原点即可。

(3) 位置误差调整, 使圆从 O_3 位置运动到坐标原点, 此时割线 $A_{15}A_{14}$ 与 $A_{36}A_{35}$ 重合, 完成一次运动轨迹的拟合。

连续重复以上过程 6 次既可完成整个半圆运动拟合。从以上分析可以看出, 整个运动轨迹的拟合可以直接从圆心 O 的变化过程体现出来, 图 7 中圆心 O 的变化轨迹为 $\Delta O_1 O_2 O_3$, 且每一次拟合运动三角形的边长变化范围就是整个拟合轨迹的变化范围, 即运动轨迹拟合的精度。如果 n 足够大, 曲面光栅的运动轨迹将会在所设定的误差范围内。而对于反方向的圆弧运动轨迹拟合, 只需要将上述过程中各步骤的运动方向取反即可。

进行一般意义的推广, 建立如图 8 所示的直角坐标系。坐标系中 Y 轴平行于图 4 坐标系的 Y 轴, r_1 为圆弧 $B_n B_0$ 的半径, r_2 为涡轮半径, r_3 为 $O_1 O_2$ 距离, γ 为运动起始角, θ 为圆弧 $B_n B_0$ 的圆心角, 设圆弧运动拟合次数为 n 。

当轨迹进行顺时针方向拟合时, 第一次调整

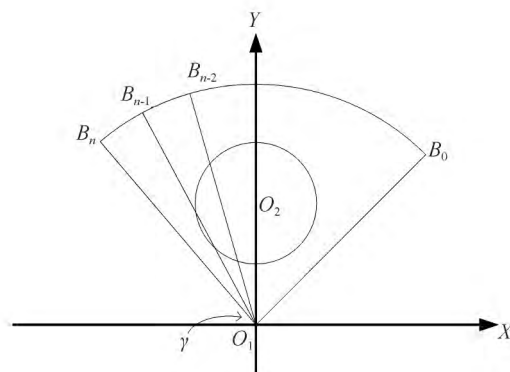


图 8 以曲面光栅圆心为坐标原点建立坐标系

Fig. 8 Coordinate system with curved grating's center as its origin

X 、 Y 轴的运动距离为:

$$\begin{cases} \Delta 1x = \left| r_1 \cos\left(\gamma + \frac{\theta}{n}\right) - r_1 \cos \gamma \right| \\ \Delta 1y = \left| r_1 \sin\left(\gamma + \frac{\theta}{n}\right) - r_1 \sin \gamma \right| \end{cases} \quad (21)$$

第二次涡轮旋转时, X 、 Y 轴的变化量为:

$$\begin{cases} \Delta 2x = r_3 \sin \frac{\theta}{n} \\ \Delta 2y = r_3 \left(1 - \cos \frac{\theta}{n} \right) \end{cases} \quad (22)$$

第三次调整时, X 、 Y 轴的运动距离为:

$$\begin{cases} \Delta 3x = \Delta 1x - \Delta 2x \\ \Delta 3y = \Delta 1y - \Delta 2y \end{cases} \quad (23)$$

重复以上过程 n 次, 就可以完成整个圆弧在顺时针方向的拟合, 如果需要逆时针运行, 所计算的数据逐次取反即为逆时针运行时拟合轨迹的数据。

采用上述拟合方法拟合数据的计算只需要完成一次即可, 但要完成整个刻蚀过程还需要包括初始相对入射角、双向往复次数、单向拟合次数、单次拟合的运动距离、方向及角度等数据。

4 实验验证与误差分析

控制系统的定位精度是反映一个系统加工能力的重要指标, 决定了高精密定位工作台的加工精度。定位精度的含义常定义为运动部件的实际位置和期望值的接近程度, 该程度通常用定位误差来表示。定位误差越大, 表明运动部件的实际

位置越偏离期望值;定位误差越小,表示运动部件的实际位置越接近于期望值。

为检验三维工作台的定位精度、重复性及稳定性,在二维直线运动方向加入光栅尺进行位置反馈,在转动运动方向加入编码器进行转角反馈。对不同参数下的工作台运动轨迹进行多组测量实验,将实测轨迹与理想轨迹进行对比分析,计算出工作台的定位精度和转角精度。

4.1 平面光栅运动轨迹

图 9 为制作刻蚀角度为 5° 、尺寸为 $85\text{ mm} \times 85\text{ mm}$ 的平面光栅时工作台往复运动 15 个周期的运动轨迹。图 10 为工作台实测运动轨迹与理论轨迹在 Y 方向上的距离误差。工作台往复运动 15 个周期的运动轨迹的斜率偏差(与 X 轴夹角)小于 0.02° ,累积定位误差小于 0.218 mm 。

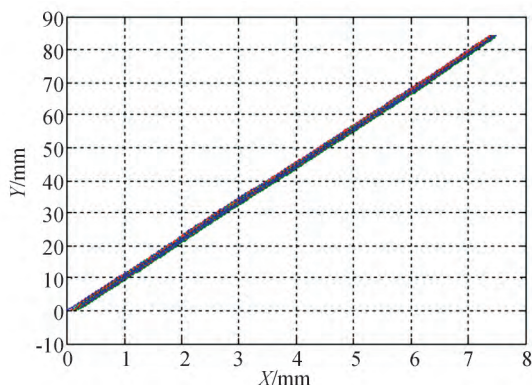


图 9 直线拟合运动轨迹

Fig. 9 Tracks of linear fitting motion

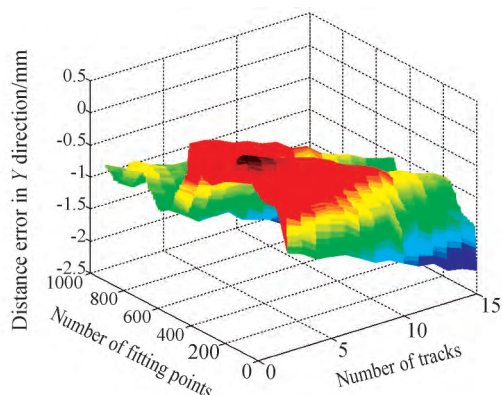


图 10 直线拟合运动轨迹的 Y 方向误差

Fig. 10 Distance error of linear fitting motion in Y direction

4.2 凸面光栅运动轨迹

图 11 为制作刻蚀入射角度为 4.8° 、曲率半径为 73.3 mm 、尺寸为 $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 的凸面光栅

时工作台往复运动 40 个周期的运动轨迹的一部分。图 12、图 13 分别为工作台曲线拟合运动的累积定位误差和旋转角度误差(横坐标为运动轨迹上的拟合点),累积定位误差小于 0.2 mm ,转角误差为 $-0.2^\circ \sim 0.1^\circ$ 。

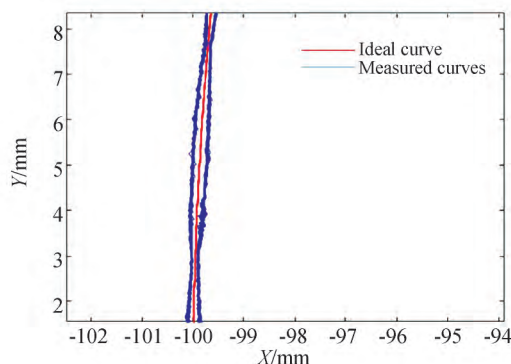


图 11 工作台的曲线拟合运动轨迹

Fig. 11 Curve fitted track of stage motion

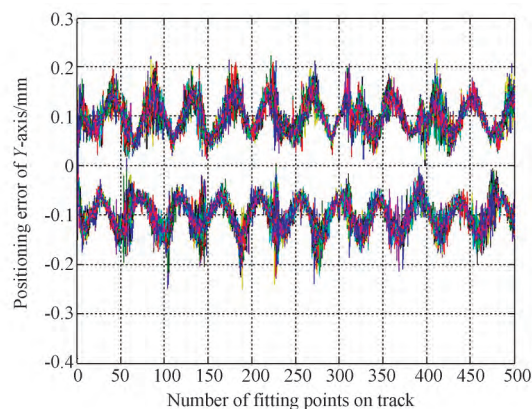


图 12 曲线拟合运动的累积定位误差

Fig. 12 Cumulative positioning error of curve fitting motion

4.3 三维工作台精度分析

由实验数据和计算结果可知,工作台直线拟合运动轨迹的定位误差随着往复次数的增加有增大的趋势,而斜率误差基本保持不变,即直线轨迹的方向稳定性较好;而曲线拟合运动轨迹的定位误差和转角误差均呈周期性变化,始终处于一定范围内。

本文所研究的三维工作台由装样品台、步进电机及其控制系统、传动系统(丝杠导轨、涡轮蜗杆)和检测元件(光栅尺及编码器)等组成。工作台运动轨迹的误差可能来源于以下几点:

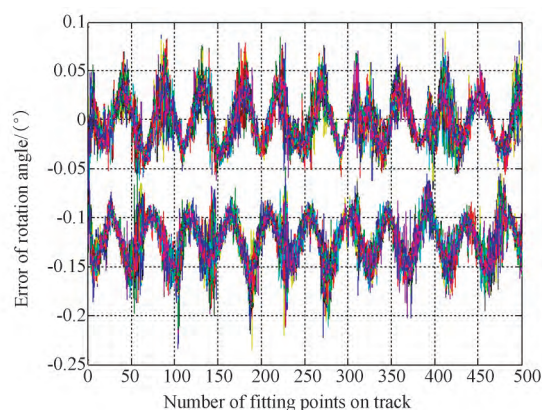


图 13 曲线拟合运动的旋转角度误差

Fig. 13 Rotating angle error of curve fitting motion

(1) 步进电机、传动系统自身的系统误差(如蜗轮蜗杆引起的曲线运动误差的周期性变化);

(2) 光栅尺、编码器的分辨率和制造安装误差;

(3) 工作台各元件的装调误差;

(4) 负载阻力扰动、摩擦力扰动、机械谐振以及外界环境变化等外界扰动因素。

由此可知,通过改进硬件设施(电机、传动系统、抗震系统等)和优化控制算法可以提高三维工作台的精度。

参考文献:

- [1] JOHNSON L F, INGERSOLL K A. Asymmetric triangular grating profiles with 90° groove angles produced by ion-beam erosion[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(17): 2951-2961.
- [2] AOYAGI Y, NAMBA S. Blazed ion-etched holographic gratings[J]. *Optica Acta*, 1976, 23(9): 701-707.
- [3] HUTLEY M C. *Diffraction Gratings*[M]. London: Academic Press, 1982.
- [4] OSTERRIED K, HEIDEMANN K F, NELLES B. Groove profile modification of blazed gratings by dip coating with hardenable liquids[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(34): 8002-8007.
- [5] DE A MELLO B, DA COSTA I F, LIMA C R A, et al.. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(4): 597-603.
- [6] LIN H, LI L F. Fabrication of extreme-ultraviolet blazed gratings by use of direct argon-oxygen ion-beam etching through a rectangular photoresist

5 结 论

本文对曲面闪耀光栅刻蚀机三维工作台的运动轨迹进行了理论计算,提出了一种适用于三维工作台的圆弧拟合算法,实现了三维工作台曲线拟合运动的运动控制,并对三维工作台的定位精度和转动精度进行了误差分析。在多组工作参数下开展了三维运动工作台运动轨迹的测量实验,并将理论轨迹与实测轨迹进行了对比。实验结果表明,工作台进行刻蚀入射角为 5° 的 15 个周期往复直线拟合运动的累积定位误差小于 0.218 mm,角度误差小于 0.02° ;制作刻蚀入射角为 4.8° 、曲率半径为 73.3 mm、尺寸为 $32\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 的凸面光栅时,40 个周期曲线拟合运动的累积定位误差小于 0.2 mm,转角误差在 $-0.2^\circ \sim 0.1^\circ$ 。由此验证了该算法用于三维工作台运动控制的可行性,满足工作台的运动精度要求。

通过增加数据拟合点、更改电机速度、改善工作台抗震性能以及建立定量分离的误差模型进行误差补偿,可以进一步提高工作台的精度,因此是下一步的工作重点。

- mask[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(33): 6212-6218.
- [7] 吕强,李文昊,巴音贺希格,等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 39-50.
- LÜ Q, LI W H, BAYANHESHIG, et al.. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 39-50. (in Chinese)
- [8] 李晓莹,吴焱,虞益挺,等. 闪耀角可调微型可编程光栅的优化设计与仿真模拟[J]. *光子学报*, 2016, 45(4): 405002.
- LI X Y, WU Y, YU Y T, et al.. Optimization design and numerical simulation of micro programmable gratings with tunable blazed angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4): 405002. (in Chinese)
- [9] 王保清,王传珂,易涛,等. 错位双光栅色散元件设计及衍射效率研究[J]. *光子学报*, 2015, 44(10): 1030003.
- WANG B Q, WANG CH K, YI T, et al.. Investigation into the design and diffraction efficiency of shifted dual transmission grating[J]. *Acta Photon-*

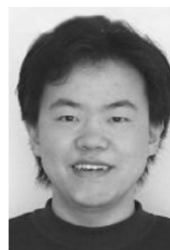
- ca Sinica, 2015, 44(10): 1030003. (in Chinese)
- [10] NELLES B, HEIDEMANN K F, KLEEMANN B. Design, manufacturing and testing of gratings for synchrotron radiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 467-468: 260-266.
- [11] BRITTEN J A, MOLANDER W A, KOMASHKO A M, et al.. Multilayer dielectric gratings for petawatt-class laser systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5273: 1-7.
- [12] BAZHANOV Y V, KULAKOVA N A. Analysis of the efficiency of concave diffraction gratings in the scalar approximation[J]. *Journal of Optical Technology*, 2002, 69(12): 886-888.
- [13] 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 International Conference & Exhibition, EUSPEN*, 2017: 173-177.
- [14] MOUROULIS P, WILSON D W, MAKER P D, et al.. Convex grating types for concentric imaging spectrometers[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(31): 7200-7208.
- [15] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2134-2141. (in Chinese)
- [16] 崔继文, 刘雪明, 谭久彬. 超精密级二维工作台的目标定[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 1960-1966.
- CUI J W, LIU X M, TAN J B. Self-calibration for 2-D ultra-precision stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1960-1966. (in Chinese)
- [17] 张昔峰, 黄强先, 袁钰, 等. 具有角度修正功能的大行程二维纳米工作台[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1811-1817.
- ZHANG X F, HUANG Q X, YUAN Y, et al.. Large stroke 2-DOF nano-positioning stage with angle error correction[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1811-1817. (in Chinese)
- [18] GAO Z Y, HU J CH, ZHU Y, et al.. A new 6-degree-of-freedom measurement method of X-Y stages based on additional information[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 606-620.
- [19] GLUSS B. A line segment curve-fitting algorithm related to optimal encoding of information[J]. *Information and Control*, 1962, 5(3): 261-267.
- [20] SHEN L X, YANG F, WANG X F, et al.. Functional curve fitting algorithm via multi-heterogeneous data curve[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 470-479.
- [21] LEI N, LI Q, HU Y T, et al.. A digital TDI operation method of array CCD based on curve fitting algorithm[C]. *Proceedings of the 3rd International Symposium of Space Optical Instruments and Applications*, Springer, 2017, 192: 383-391.

作者简介:



沈 晨(1992—),男,安徽池州人,博士研究生,2012 年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事衍射光学元件精密加工的研究。E-mail: secele92@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



谭 鑫(1981—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,2003 年、2008 年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事光栅设计制作技术及光学器件微细加工技术的研究。E-mail: xintan_grating@163.com

导师简介:



齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,博士生导师,1987 年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1993 年于中国矿业大学获得硕士学位,主要从事光栅刻划机的研究以及衍射光栅的研制。Email: china-grating@263.net