

# 光栅刻划机进给导轨直线度误差对光栅衍射波前及杂散光的影响

黄元申<sup>1,2</sup> 黄运柏<sup>1,2</sup> 杨海马<sup>1,2</sup> 李柏承<sup>1,2</sup> 苏仰庆<sup>1,2</sup> 盛 斌<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093

<sup>2</sup>上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

**摘要** 对光栅刻划机的进给导轨直线度误差做了系统的研究, 推导了直线度误差对光栅衍射波面和杂散光的影响的计算公式, 并且定义了干涉仪测量轴线到刻线始端这段距离为定位臂。得出以下结论: 定位臂会放大进给导轨的直线度误差; 光栅的衍射波前和杂散光强度主要受定位臂和导轨直线度大小的影响, 若定位臂为 50 mm, 则水平方向直线度误差必须小于 0.15", 若定位臂为 10 mm, 则水平方向直线度误差必须小于 0.74"; 与竖直方向的直线度相比, 刻划机对进给导轨水平方向的直线度要求更高。理论推算与实验结果相符。

**关键词** 光栅; 直线度误差; 定位臂; 衍射波前; 杂散光强度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0506005

## Influence of Feeding Guide's Straightness Errors of Grating Ruling Machine on Diffraction Wave-Front of Grating and Intensity of Stray Light

Huang Yuanshen Huang Yunbai Yang Haima Li Baicheng  
Su Yangqing Sheng Bin

<sup>1</sup>Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education, Shanghai 200093, China

<sup>2</sup>Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China

**Abstract** A comprehensive analysis has been made for straightness errors of feeding guide of grating ruling machine, and some mathematical expressions have been deduced among the straightness errors, the diffraction wave-front and the intensity of stray light, and the distance from the measurement axis of interferometer to the beginning of lines has been defined as position arm. Some following conclusions have been made. Position arm can magnify the straightness errors of dividing guide. The diffraction wave-front and the intensity of straight light are mainly affected by the position arm and the straightness errors of feeding guide. If the position arm is 50 mm, the horizontal straightness errors must be less than 0.15". However, if the position arm is 10 mm, the horizontal straightness errors must be less than 0.74". Compared with the straightness in the vertical direction, the requirement of the grating-ruling machine for the horizontal straightness of dividing guide is higher. The value of theoretical calculation coincides with the experimental results.

**Key words** gratings; straightness errors; position arm; diffraction wave-front; intensity of stray light

**OCIS codes** 050.1950; 050.1960; 050.1970

收稿日期: 2014-11-03; 收到修改稿日期: 2015-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(61378060、61205156、11105149)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ170004)、上海市教委曙光项目(11SG44)、上海市教育委员会科研创新项目(14YZ095)

作者简介: 黄元申(1963-), 男, 硕士, 教授, 主要从事机械刻划光栅、全息光栅、亚波长光栅等方面的研究。

E-mail: hyshyq@sina.com

## 1 引 言

在光谱仪器中,为了达到高分辨率的目的,往往需要使用刻线密度或刻划面积很大的闪耀光栅,从而导致光谱仪的体积较大,这有违当今科学仪器小型便携化的发展趋势<sup>[1-4]</sup>。而且使用面积很大的光栅,也增加了大面积光栅的制作难度<sup>[5]</sup>。中阶梯光栅是一种平面粗光栅,它的光栅常数较大,工作级次很高,且具有高分辨率的特点,这使得它广泛应用于大型光谱仪器中<sup>[6]</sup>。目前,其制作方法主要是机械刻划法<sup>[7-9]</sup>。光栅刻划机是实现机械刻划法的主要设备,主要由进给系统和刻划系统两大部分组成。传动机构的精度、光电控制系统的精度及稳定性、刻划机座的防震、温度和气压变化以及分度导轨的直线度优劣等各种因素都可能使刻划机在刻制中阶梯光栅时产生误差,都将使得光栅刻线偏离正确位置,从而降低光栅的光谱质量<sup>[10-11]</sup>。

本文主要分析了分度导轨在水平和竖直两个方向的直线度误差对中阶梯光栅的衍射波前和杂散光的影响。因为光栅的衍射波前包含了大部分影响光栅的因素的信息<sup>[12]</sup>,为了分析进给导轨直线度误差对光栅质量的影响,可对刻划出来的光栅衍射波前进行检测、分析及验证;也可通过对衍射波前的检测和分析来检查进给导轨直线度的优劣,从而达到指导刻划的目的,这有利于光栅刻划技术的进一步改进与完善。

## 2 理论分析

光栅刻划机的分度定位系统采用的是 Agilent 公司的双频激光干涉仪,它将测量反射镜与放置光栅基底的工作台固连在一起,当工作台移动时,通过测量反射镜相对于参考反射镜的位移来反映工作台的移动距离,从而达到定位进给的目的。图 1 为双频激光干涉仪测量光路示意图,其中, $z$  为光栅刻划机的进给方向, $x$  为刻划方向, $y$  为抬刀方向;当光栅基底随工作台沿  $z$  轴向右进给一个光栅常数  $d$  后,刻划机的刻划系统沿  $x$  方向刻划出一根线,而后再向右进给一个光栅常数  $d$ ,如此反复,直至完成整块光栅的刻划。

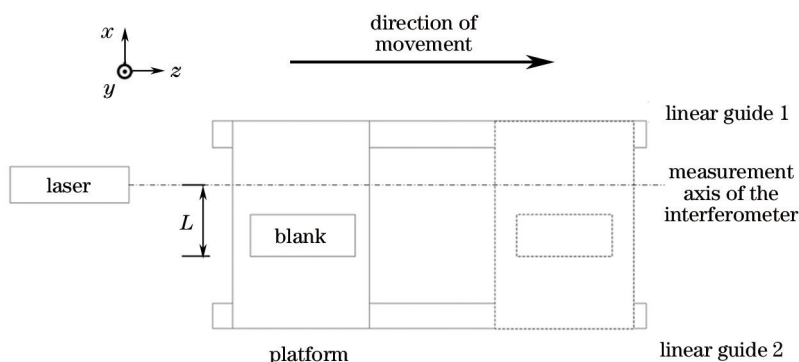


图 1 双频激光干涉仪测量光路示意图

Fig.1 Measurement optical path of dual-frequency laser interferometer

### 2.1 误差来源

由于激光干涉仪的测量分辨率相当高,测量过程中的各种误差都将直接影响最终的定位精度,其中,在工作平台作进给运动时,若进给运动轨迹不在一条直线上,即测量轴线与工作台的运动轴线不平行,就会同时在  $z$  轴的水平方向和竖直方向上使测量结果与被测对象的实际位置之间存在差值,分别称之为导轨水平和竖直直线度误差。

如图 2 所示,当  $z$  轴在水平方向的导轨直线度不好时,即存在水平直线度误差  $\alpha$  时,刻划机的进给周期即光栅常数随着偏离的角度变化而变化。

由图 2 中的几何关系可以得到光栅刻线位置误差  $\Delta d$  为:

$$\Delta d = d - d_i = d - (d - L \sin \alpha) = L \sin \alpha . \quad (1)$$

由(1)式可知,光栅刻线位置误差  $\Delta d$  的大小是直接由定位臂  $L$  和导轨直线度误差  $\alpha$  决定的,即导轨水平直线度误差会直接引起光栅刻线位置误差,而且当定位臂  $L$ (见图 1)即干涉仪测量轴线到光栅刻线始端的距离不合理时,会放大这类光栅刻线位置误差。当存在导轨直线度误差时,理论上可以通过将定位臂  $L$  减小至 0 mm 来降低直线度误差对刻线位置的影响,图 3 为理想状态下的影响示意图。

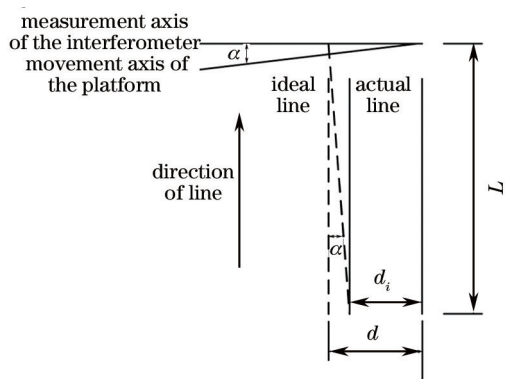


图2 z轴水平方向的直线度误差对刻槽周期的影响示意图

Fig.2 Influence on groove cycle induced by horizontal straightness error of z axis

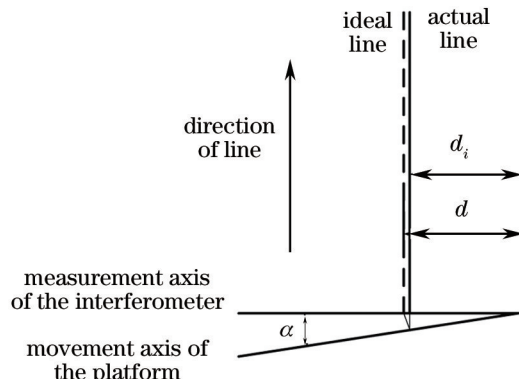


图3 定位臂L为零的理想状态示意图

Fig.3 Ideal state which position arm is zero

图2中 $\alpha$ 为水平直线度误差, $L$ 为定位臂, $d$ 为理想光栅周期, $d_i$ 为受直线度误差影响的光栅周期。

由图3可得光栅刻线位置误差  $\Delta d$  为

$$\Delta d = d - d_i = d - (d - d \sin^2 \alpha) = d \sin^2 \alpha . \quad (2)$$

由于光栅刻划机要求的精度很高,所以在实际的刻划运动中, $\alpha$ 为小量,即 $\alpha \rightarrow 0$ ,所以在理想状态下 $\Delta d \rightarrow 0$ 。然而,由于一台光栅刻划机要兼顾多种规格光栅的刻划,再加上刻划机本身的凸轮刻划结构的限制<sup>[12]</sup>,在刻划光栅时,不存在定位臂 $L$ 为0 mm的情况。现实中更多的情况主要有三种,分别是干涉仪测量轴线在工作台的上下两端或中间,所以只能通过保证导轨的直线度来减小光栅刻线位置的误差。

如图4所示,当z轴在竖直方向的导轨直线度不好时,即存在竖直直线度误差 $\beta$ 时,金刚石刻划刀与玻璃基底的夹角,即光栅的闪耀角,会随着偏离角度的变化而变化。

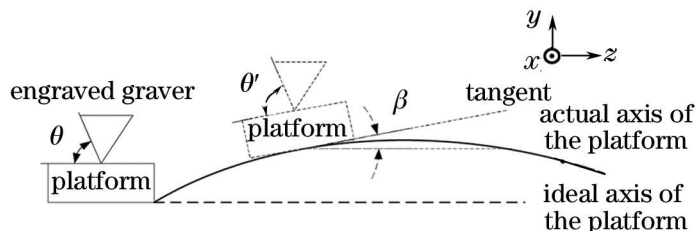


图4 z轴竖直方向的直线度误差对刻槽闪耀角的影响示意图

Fig.4 Influence on the groove blazed angle induced by vertical straightness error of z axis

图4中, $\theta$ 为所需要的光栅闪耀角目标值,但是由于工作台的实际移动轨迹偏离理想移动轨迹,会引起闪耀角的变化:

$$\theta' = \theta + \beta . \quad (3)$$

由此可知,z轴竖直方向上的直线度误差会引起闪耀角的误差,而水平方向上的直线度误差会对刻线的定位产生影响。

将着重分析z轴水平直线度误差和竖直直线度误差对光栅一些性能指标的影响及反推出刻划光栅对刻划机直线度的要求。

## 2.2 对衍射波前的影响

### 2.2.1 z轴水平方向的直线度误差对衍射波前的影响

理想光栅具有均匀等间距的槽型,入射光在自准直条件下入射,其衍射波前为平面,如图5中虚线所示;然而,由于z轴水平方向上存在直线度误差(假设竖直方向为理想状态),光栅刻划机进给周期变得不均匀,会产生刻线位置误差 $\Delta d$ ,从而使光栅的实际衍射波前偏离理想波前,如图5中实线所示。

若入射光自准直入射到光栅平面上,光栅的闪耀角为 $\theta$ ,光栅常数为 $d$ ,那么由该刻线位置误差 $\Delta d$ 引起的衍射波前差为

$$\Delta \eta = 2 \Delta \delta = 2 \Delta d \sin \theta . \quad (4)$$

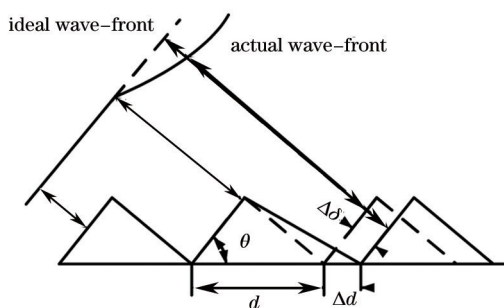


图 5 z 轴水平直线度误差对衍射波前的影响示意图

Fig.5 Influence on wave-front induced by horizontal straightness error of z axis

根据(1)式和(4)式,可以得到水平方向的直线度误差与衍射波前差的关系为

$$\Delta\eta = 2L \sin \alpha \sin \theta, \quad (5)$$

式中  $d$  为光栅常数,  $L$  为定位臂,  $\theta$  为光栅闪耀角,  $\alpha$  为  $z$  轴水平方向的直线度误差。

现取一块规格为  $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的  $79 \text{ line/mm}$  的中阶梯光栅,它的光栅常数  $d$  为  $12658 \text{ nm}$ ,光栅闪耀角  $\theta$  为  $63^\circ$ ,定位臂  $L$  分别取  $50 \text{ mm}$ 、 $80 \text{ mm}$ 、 $100 \text{ mm}$  (分别记为  $L_1, L_2, L_3$ ),作图分析  $z$  轴水平直线度误差  $\alpha$  对衍射波前差  $\Delta\eta$  的影响。

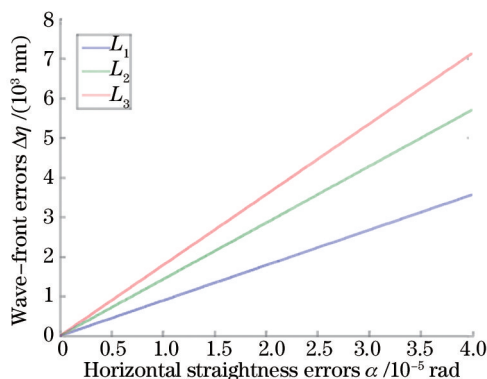


图 6 z 轴水平直线度误差  $\alpha$  对衍射波前差  $\Delta\eta$  的影响分析

Fig.6 Analysis on wave-front induced by horizontal straightness errors of z axis

由(5)式和图 6 可知,光栅衍射波前差  $\Delta\eta$  与安装臂  $L$  和进给导轨水平直线度误差  $\alpha$  的正弦值成正比。

而对于要刻划的规格为  $50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 、闪耀角为  $63^\circ$  的  $79 \text{ line/mm}$  的中阶梯光栅来说,使用的激光波长为  $632.8 \text{ nm}$ ,当要求衍射波前差  $\Delta\eta$  小于  $\frac{\lambda}{10}$  时,若定位臂为  $50 \text{ mm}$ ,则  $z$  轴在水平方向上的直线度误差  $\alpha$  必须满足  $\alpha \leq 0.15''$ ,若定位臂为  $10 \text{ mm}$ ,则  $z$  轴水平方向上的直线度误差  $\alpha$  必须满足  $\alpha \leq 0.74''$ ;然而,由于实验条件和机械结构的限制,进给导轨的直线度误差不可能很小,因此在满足刻划机械结构的前提下,尽量地缩短定位臂,可减小由进给导轨水平直线度误差对衍射波前带来的影响。

### 2.2.2 z 轴垂直方向的直线度误差对衍射波前的影响

在刻划中阶梯光栅时,理想光栅的每条刻槽的闪耀角都是相等的,但是当刻划机的进给轨迹在竖直方向上不是一条直线时(假设水平方向为理想状态),刻划出来的光栅的前后闪耀角就容易不一致,即前一条刻槽和后一条刻槽的闪耀角存在差值,称为闪耀角变化误差,如图 7 所示。

波长为  $\lambda$  的平行光入射到光栅上,由于光栅的入射角和衍射角是相对光栅平面法线而言的,根据光栅方程式  $2d(\sin \theta_i + \sin \theta_d) = m\lambda$ ,对于相同的衍射级次  $m$ ,即使存在闪耀角变化,其衍射角  $\theta_d$  却是不变的。因为闪耀角不一致,存在差值  $\beta$ ,所以实际波前呈曲面形态,偏离理想波前。由该闪耀角变化误差  $\beta$  引起的最大衍射波前差为:

$$\Delta\eta = 2\Delta\delta = 2d \cos \theta \tan \beta, \quad (6)$$

式中  $d$  为光栅常数,  $\theta$  为光栅目标闪耀角,  $\beta$  为导轨竖直方向上工作台移动轴线偏离干涉仪测量轴线的

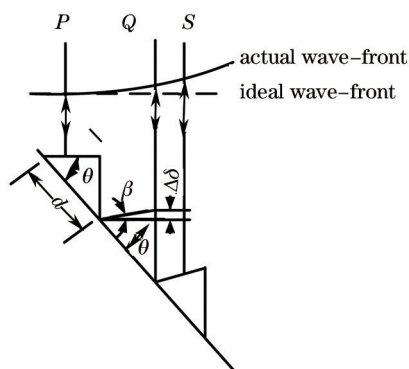


图7 闪耀角变化误差对衍射波前的影响示意图

Fig.7 Influence on wave-front induced by blazed angle error

角度,即闪耀角变化值。

假设一块 79 line/mm 的中阶梯光栅,它的光栅常数  $d$  为 12658 nm,其常用的光栅闪耀角  $\theta$  为  $35^\circ$ 、 $63^\circ$ 、 $74^\circ$  (记为:  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ),作图分析导轨竖直直线度误差  $\beta$  对衍射波前差  $\Delta\eta$  的影响。

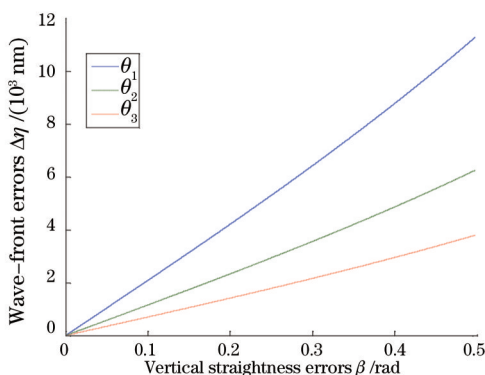


图8 竖直直线度误差  $\beta$  对衍射波前差  $\Delta\eta$  的影响分析

Fig.8 Analysis on wave-front induced by vertical straightness errors of z axis

由(6)式和图8可知,光栅衍射波前差  $\Delta\eta$  与闪耀角的余弦值和进给导轨竖直直线度误差  $\beta$  的正切值成正比。

综上所述,对于要刻划的规格为 50 mm × 100 mm、闪耀角为  $63^\circ$  的 79 line/mm 的中阶梯光栅来说,若使用的激光波长为 632.8 nm,要求衍射波前差  $\Delta\eta$  小于  $\frac{\lambda}{10}$ ,则竖直方向上的直线度误差  $\beta$  须满足  $\beta \leq 18.93'$ ,由此可见,光栅刻划机对进给导轨水平方向的直线度要求更高。然而光栅刻划机作为高精密度仪器,在实际情况中为了保证两根导轨优良的直线度,都会要求导轨的竖直直线度远远小于理论计算值  $18.93'$ ,达到  $1''$  以内。

### 2.3 z轴水平方向的直线度误差对杂散光强度的影响

当光栅存在非常小的随机的不规则刻槽位置误差,刻槽缺陷以及光栅基坯表面微区缺陷等时,会在光栅衍射时产生背景光,称为杂散光<sup>[13]</sup>。刻槽缺陷以及光栅基坯表面微区缺陷是由刻划工艺决定的,不规则刻槽位置误差是由定位精度决定的。由上述分析可知竖直直线度误差不会引起刻槽位置的变化,所以其对杂散光强度的影响不大,因此,需要讨论的是由水平直线度误差引起的刻槽位置误差对杂散光的影响。杂散光占入射光的比例由刻槽位置的均方根误差决定,衍射光栅在李特洛安装条件下杂散光的标量计算式为<sup>[14]</sup>:

$$P_\eta = \left( \frac{4\pi R_c \sin \theta}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{2\pi m R_c}{d} \right)^2, \quad (7)$$

式中  $P_\eta$  为杂散光,  $R_c$  为刻槽位置的均方根误差,  $\theta$  为衍射角,  $\lambda$  为入射光波长,  $m$  为衍射级次,  $d$  为光栅常数。

假设刻槽位置误差为  $\Delta d_i$ , 所以刻槽位置的均方根误差  $R_c$  为:



$$R_c = \sqrt{\frac{\sum(\Delta d_i)^2}{n}} \quad (8)$$

所以,由(1)式、(7)式和(8)式可得杂散光  $P_\eta$  和  $z$ 轴水平直线度误差 $\alpha$ 的关系为:

$$P_\eta = \left(\frac{2\pi m R_c}{d}\right)^2 = \frac{4\pi^2 m^2 L^2}{d^2 n} \sum(\sin \alpha_i)^2 \quad (9)$$

假设一块 50 mm × 100 mm 的 79 line/mm 的中阶梯光栅,它的光栅常数  $d$  为 12658 nm,对于波长为 632.8 nm 的检测光而言,其衍射级次为 35;现取定位臂  $L$  分别为 50、80、100 mm(记为  $L_1, L_2, L_3$ ),作图分析水平直线度误差 $\alpha$ 对杂散光  $P_\eta$  的影响。

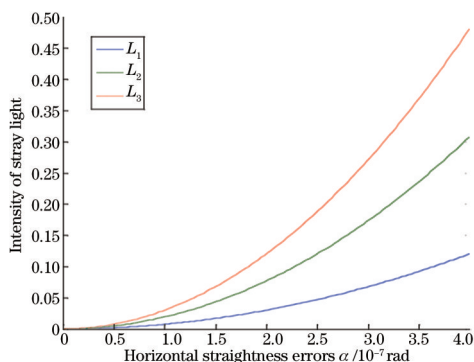


图9  $z$ 轴水平直线度误差 $\alpha$ 对杂散光  $P_\eta$  的影响分析

Fig.9 Analysis on the intensity of stray light induced by horizontal straightness error of  $z$  axis

由(9)式和图9可知,杂散光的强度主要受定位臂  $L$  和进给导轨水平直线度误差 $\alpha$ 的影响,而定位臂  $L$  会放大进给导轨直线度误差带来的影响。而一般要求光栅的散射光与入射光的比值为:

$$P_\eta \leq 1\% \quad (10)$$

对于入射角为  $63^\circ$  的 79 line/mm 的中阶梯光栅而言,当使用的激光波长为 632.8 nm,其衍射级次为 35 级时,若定位臂为 50 mm,则  $z$ 轴水平方向的平均直线度误差必须满足  $\bar{\alpha} \leq 0.03''$ ;若定位臂为 10 mm,则  $z$ 轴水平方向的平均直线度误差必须满足  $\bar{\alpha} \leq 0.12''$ 。由此可知,合理的定位臂可消除由进给导轨直线度不好对光栅性能带来的不良影响,进而可保证光栅的质量。

### 3 实验分析

由前面的分析可知,与竖直方向上的直线度相比,导轨在水平方向上的直线度对刻划出来的光栅质量有着更为至关重要的影响,为此针对导轨在水平方向的直线度而设计了四组实验:光栅刻划机进给导轨在竖直方向上的直线度误差小于  $1''$ ,其中实验一和实验二的导轨水平直线度不同,实验一、三、四的定位臂不同,实验参数如表1所示,来验证水平直线度对光栅质量的影响。刻划前,用DUMA准直仪测量出直线度偏离角误差,用清华微片激光回馈干涉仪测其累积误差值;且用ZYGO干涉仪检测不同条件下刻划出来的光栅的闪耀波面,验证导轨水平直线度误差和定位臂对衍射波面的影响。

表1 四组刻划实验参数

Table1 Experimental parameters of four groups

Serial number	Maximum of horizontal straightness errors $\alpha / (''$ )	Position arm $L/mm$	Position of ruling/mm
1	6.3	50	90~190
2	0.2	50	90~190
3	6.3	80	90~190
4	6.3	100	90~190

光栅刻划机导轨的行程为 220 mm,由于实验设备和机械结构的限制,进给导轨的水平直线度最优只能调整到  $0.2''$ ,而为了消除竖直直线度误差带来的影响,在保证竖直方向上的直线度小于  $1''$ 的前提下,改变水

平方向上的直线度,用准直仪和干涉仪去测其整个行程内的直线度误差和累积误差,并在90~190 mm的导轨行程内刻划规格为100 mm × 50 mm、入射角为63°的79 line/mm的中阶梯光栅,用波长为632.8 nm的ZYGO干涉仪检测刻划出来的光栅的闪耀波面。

实验一:

用准直仪测得220 mm行程内导轨的最大偏离角为6.3",在90~190 mm行程内的偏离角差值为3.4",其直线度误差曲线如图10所示。

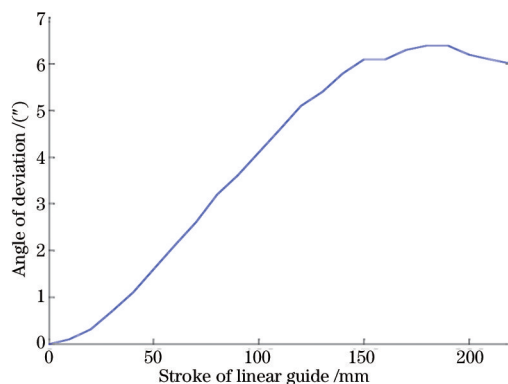


图10 实验一准直仪直线度误差曲线

Fig.10 Straightness error curve measured by collimator of experiment I

用微片激光回馈干涉仪测得220 mm行程内导轨的最大累积误差约为2300 nm,其累积误差曲线如图11所示。ZYGO干涉仪测得刻划出来的光栅的闪耀波面峰谷(PV)值为1430 nm,衍射波面如图12所示。

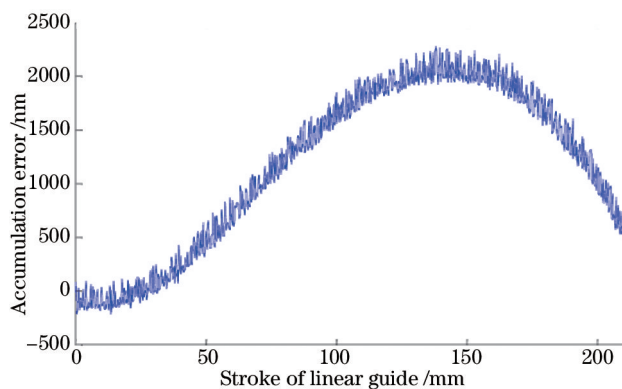


图11 实验一干涉仪累积误差曲线

Fig.11 Accumulation error curve measured by interferometer of experiment I

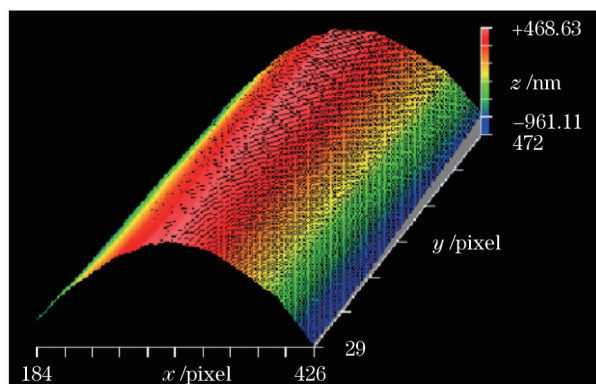


图12 实验一光栅ZYGO的衍射波前图

Fig.12 Wave-front measured by ZYGO of experiment I

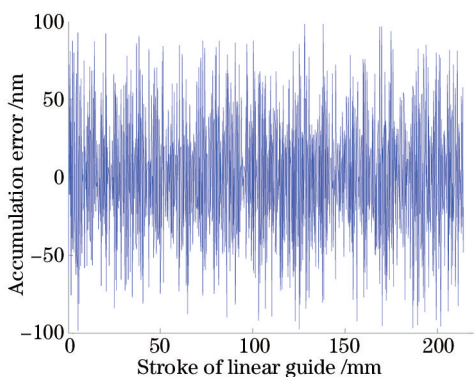


图13 实验二干涉仪累积误差曲线

Fig.13 Accumulation error curve measured by interferometer of experiment II

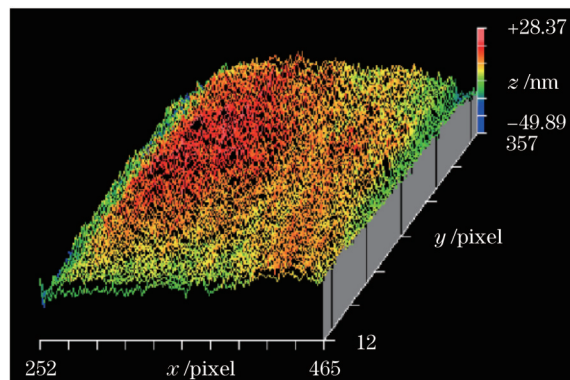


图14 实验二光栅ZYGO的衍射波前图

Fig.14 Wave-front measured by ZYGO of experiment II

实验二:

进给导轨整个行程内水平方向的直线度误差小于 $0.2''$ ;而微片激光回馈干涉仪测得200 mm行程内累积误差曲线如图13所示。

ZYGO干涉仪测得闪耀波面的PV值为78 nm,衍射波面如图14所示。

实验三:

进给导轨的水平直线度和实验一一致,仅把定位臂由实验一的50 mm加长到80 mm,刻划出来光栅闪耀波面的PV值为2454 nm,衍射波面如图15所示。

实验四:

实验四的刻划条件和实验一相同,仅把定位臂由实验一的50 mm加长到100 mm,由此刻划出来光栅闪耀波面的PV值为2972 nm,衍射波面如图16所示。

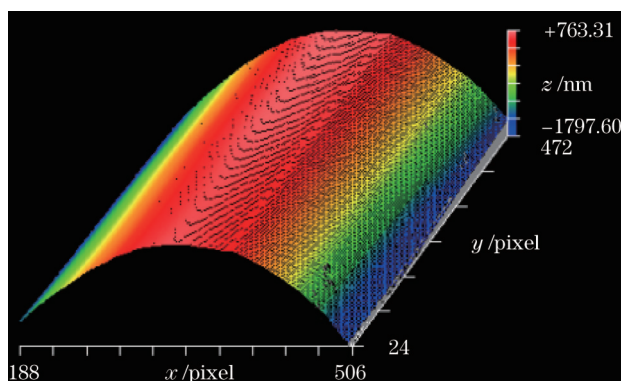


图15 实验三光栅ZYGO的衍射波前图

Fig.15 Wave-front measured by ZYGO of experiment III

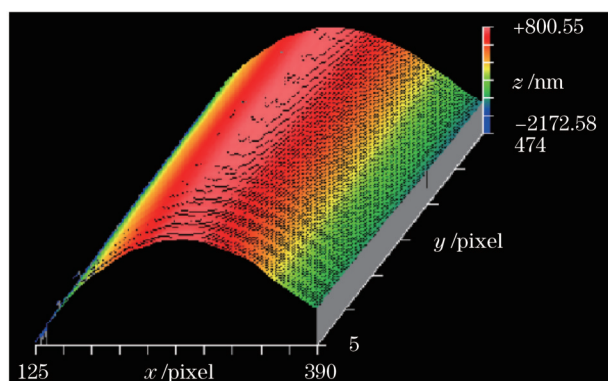


图16 实验四光栅ZYGO的衍射波前图

Fig.16 Wave-front measured by ZYGO of experiment IV

分析实验一和实验二可知,这两个实验得出的水平直线度误差曲线、累积误差曲线和衍射波面弯曲的趋势一致,因此可以得到这样的结论:衍射波前差与进给导轨的水平直线度误差的正弦值成正比。

分析实验一、实验三和实验四可得,当进给导轨的水平直线度误差一定时,增长刻划机的定位臂,刻划出来的光栅衍射波前差会变大,而且变化趋势也与(5)式近似。故得出如下结论:衍射波前差与刻划机定位臂的大小成正比。

## 4 总 结

建立了光栅刻划机的进给导轨直线度误差的理论模型,充分分析了进给导轨水平方向和垂直方向的直线度误差与杂散光、衍射波面的关系,得出了如下结论:1)衍射波前差与进给导轨的水平直线度误差的正弦值成正比关系;2)衍射波前差与刻划机定位臂的大小成正比,若定位臂为50 mm,则水平方向直线度误差必须小于 $0.15''$ ;若定位臂为10 mm,则水平方向直线度误差必须小于 $0.74''$ ;3)光栅衍射波前差与进给导轨垂直直线度误差 $\beta$ 的正切值成正比;4)与垂直方向的直线度相比,刻划机对进给导轨水平方向的直线度要求更高,并且在实验中得到了验证。这为光栅刻划机的设计与调试提供了直接依据,为光栅的刻划提供了重要的参考依据,也将有利于改进现有的刻划工艺和提高平面衍射光栅的刻划质量。

## 参 考 文 献

- 1 Harrion G R, Archer J E, Camus J. A fixed-focus broad-range echelle spectrograph of high speed and resolving power[J]. J Opt Soc Am, 1952, 42(10): 706-712.
  - 2 Loewen E, Maystre D, Popov E, et al.. Diffraction efficiency of echelles working in extremely high orders[J]. Applied Optics, 1996, 35(10): 1700-1704.
  - 3 Tang Yuguo, Song Nan, Bayanheshig, et al.. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 1989-1995.
- 唐玉国,宋楠,巴音贺希格,等.中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J].光学精密工程,2010,18(9):1989-1995.



- 4 Kong Peng, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Double-grating minitype flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0105001.  
孔 鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0105001.
- 5 Liu Haitao, Huang Yuanshen, Li Baicheng, *et al.*. Optical design of echelle optical splitting system[J]. *Optical Instruments*, 2013, 35(3): 46-50.  
刘海涛, 黄元申, 李柏承, 等. 中阶梯光栅分光光路的设计[J]. *光学仪器*, 2013, 35(3): 46-50.
- 6 Xie Pin, Ni Zhengji, Huang Yuanshen, *et al.*. Application research progress in the echelle grating[J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 4-6.  
谢 品, 倪争技, 黄元申, 等. 中阶梯光栅的应用研究进展[J]. *激光杂志*, 2009, 30(2): 4-6.
- 7 Li Xiaotian, Yu Haili, Qi Xiangdong, *et al.*. 300 mm-travel stage of grating ruling engine and its self-adaptive control method[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0608001.  
李晓天, 于海利, 齐向东, 等. 光栅刻划机 300 mm 行程工作台研制及其自适应控制方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0608001.
- 8 T Kita, T Harada. Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(10): 1399-1406.
- 9 Wang Qi, Zheng Yanchang, Qiu Keqiang, *et al.*. Fabrication of echelle gratings with 90° apex angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0905001.  
王 琦, 郑衍畅, 邱克强, 等. 90° 顶角中阶梯光栅的研制[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0905001.
- 10 Ding Weitao, Huang Yuanshen, Zhang Dawei, *et al.*. Analysis of the ruling error requirements for echelle grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(9): 68-75.  
丁卫涛, 黄元申, 张大伟, 等. 中阶梯光栅刻划误差要求分析[J]. *光电工程*, 2013, 40(9): 68-75.
- 11 Li Xiaotian, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve error, location error on plane grating's performance[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0308009.  
李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 机械刻划光栅的刻线弯曲与位置误差对平面光栅性能影响及其修正方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308009.
- 12 Li Xiaotian, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Two-dimensional fast fourier transform method of analyzing the influence of plane grating's line error and surface error on grating's spectral performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1105001.  
李晓天, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 刻线误差与面型误差对平面光栅光谱性能影响的二维快速傅里叶变换分析方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1105001.
- 13 Hutley M C. *Diffraction Gratings*[M]. London: Academic Press, 1982.
- 14 Zhu Shaoji, Zou Haixin, Bao Xuecheng, *et al.*. *Diffraction Gratings*[M]. Beijing: China Machine Press, 1986.  
祝绍箕, 邹海兴, 包学诚. *衍射光栅*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

栏目编辑: 刘丰瑞