

# 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

李晓天<sup>1,2</sup> 巴音贺希格<sup>1</sup> 齐向东<sup>1</sup> 于海利<sup>1</sup> 唐玉国<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 机械刻划法是制作平面光栅的重要方法之一。深入分析了机械刻划光栅的等间距刻线弯曲和刻线位置误差对平面光栅分辨本领和杂散光等光谱性能的影响,对改善光栅质量和提高应用水平有重要的意义。根据费马原理,建立了单色平行光入射、含有刻线弯曲和刻线位置误差的平面光栅在焦平面上成像的光线追迹数学模型,研究了上述两种刻线误差对光栅光谱性能的影响。结果表明,刻线弯曲和刻线位置误差分别主要影响光栅弧矢和子午方向光谱性能,刻线弯曲对光栅分辨本领和杂散光影响较小。据此对光栅刻划机刻划系统进行了修正。修正后的刻划系统产生的刻线位置误差的统计平均值降低至原有幅值的一半以下,从而有效抑制了光栅杂散光。

**关键词** 光栅;平面光栅;光栅刻线弯曲;光栅刻线位置误差;衍射波前;光栅指标

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0308009

## Influence and Revising Method of Machine-Ruling Grating Line's Curve Error, Location Error on Plane Grating's Performance

Li Xiaotian<sup>1,2</sup> Bayanheshig<sup>1</sup> Qi Xiangdong<sup>1</sup> Yu Haili<sup>1</sup> Tang Yuguo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Machine-ruling method is one of the important methods for making plane grating. In order to improve the grating's performance and application level, it is particularly important to analysis the influence of ruling line's equal-distance curve and location error on plane grating performance, such as resolution, scattered light, etc. According to Fermat principle, a light-tracing mathematical model that simulates collimated monochromatic light incident on a plane grating which contains line's curved error, and location error and corresponding diffraction light imaged on the focal plane is established. The influence of above-mentioned grating line errors on grating performance is studied. Results show that grating line's curve and location error mainly influence grating sagittal and meridional spectral performance, separately, line's curved error has little effect on grating resolving power and scattered light. According to the analysis above, the ruling system of grating ruling machine is improved. Statistical average value of grating line's location error caused by modified ruling system is reduced to less than half of the original amplitude. Thereby grating scattered light is effectively suppressed.

**Key words** grating; plane grating; grating line's curve; grating line's location error; diffraction wavefronts; grating specification

**OCIS codes** 050.1950; 050.1960; 050.2770; 110.2650; 260.3160

收稿日期: 2012-10-09; 收到修改稿日期: 2012-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)、国家重大科研装备研制项目(ZDY2008-1)、国家重大科学仪器设备开发专项项目(11YQ120023)和吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)资助课题。

作者简介: 李晓天(1981—),男,博士研究生,主要从事光栅刻划机纳米定位监测和光栅检测技术方面的研究。

E-mail: lixt\_1981@163.com

导师简介: 唐玉国(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱仪器和医用光谱技术方面的研究。

E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

# 1 引 言

平面衍射光栅是各类光谱仪器的核心光学元件,在军事、天文、农业、食品安全、环保、化工等领域应用极为普遍<sup>[1-3]</sup>,其主要制作方法分为机械刻划法<sup>[4]</sup>和全息离子束刻蚀法<sup>[5]</sup>。其中,中阶梯光栅和红外激光光栅,由于其对槽型要求苛刻且光栅刻槽深,一般需采用机械刻划法制作。

对于采用机械刻划法制作的平面光栅(机刻光栅)而言,由于光栅刻划机刻划系统<sup>[6]</sup>的刀架导轨直线性误差、刀架导轨刚度有限和运行过程中的非线性(如摩擦、间隙)等因素<sup>[7,8]</sup>,可导致金刚石刻刀沿曲线轨迹运行,从而使机刻光栅在整体上呈等间距弯曲状,并且由于各刻线形状不重复,使得光栅产生局部的刻线位置误差。此外,由于在长时间光栅刻划过程中,刻划机分度系统机械结构蠕变、加工误差和累积误差<sup>[9,10]</sup>以及外部环境条件(如温度、湿度、振动、大气压强等)的变化<sup>[11]</sup>,导致机刻光栅的各刻线在整体上不断偏离理想位置,使光栅产生整体的刻线位置误差<sup>[12,13]</sup>。等间距刻线弯曲和刻线位置误差严重影响光栅衍射波前质量,Harrison<sup>[14]</sup>采用波前测量干涉仪对美国麻省理工(MIT)大学制造的第三代高精度大尺寸 MIT-C 型光栅刻划机制造的光栅刻线弯曲和刻线位置误差形状进行了测量,结果表明该刻划机制造的光栅也受上述两种误差影响。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在进行大型高精度光栅刻划系统研制过程中的实验结果表明,当增大光栅尺寸、提高制作精度时,刻线弯曲和刻线位置误差是影响光栅衍射波前质量的主要因素。因此,研究刻线弯曲和刻线位置误差对光栅性能的影响,将有助于细化光栅刻划机研制和改进工作的研究重点和方向,同时也将为机刻光栅光谱仪器的优化设计及像差补偿等提供理论参考。鉴于此,本文根据费马原理<sup>[15,16]</sup>,建立了平行光入射下的、含有刻线弯曲和刻线位置误差的平面机刻光栅的数学模型,分析了刻线弯曲和刻线位置误差对光栅光谱性能指标的影响,并将该非理想光栅模型带入到实际光学系统中进行分析。并根据以上分析结果,对光栅刻划机刻划系统导致的刻线位置误差进行了修正和实验分析。

## 2 光线追迹分析法

### 2.1 非理想平面光栅成像系统的理论模型

根据光线追迹理论<sup>[15,16]</sup>,建立含有刻线弯曲和刻线位置误差的非理想光栅模型。图 1 给出了单色

平行光入射至光栅表面,光栅第  $m$  级衍射光线被焦距为  $f_0$  的理想凸透镜聚焦至像平面的光学系统示意图。设平面光栅位于  $x = 0$  平面且光栅尺寸关于  $y$  轴和  $z$  轴对称, $y$  轴方向为光栅子午方向,光栅常数为  $d$ 。入射光源上任意点  $A$  与光栅的第  $n$  条刻线交于点  $P(0, \omega, l)$ ,衍射光线与透镜平面交于点  $T$ ,经透镜后与焦平面交于点  $B$ 。入射光中心点  $A_0$  与光栅表面相交于  $xyz$  坐标系的坐标原点  $O$ ,其  $m$  级衍射光垂直通过透镜中心点  $T_0$  和像平面中心点  $B_0$ ,且主光线  $A_0O$  位于  $xOy$  面内,主光线  $A_0O$  的入射角和当光栅不存在缺陷时的衍射角分别为  $\alpha_0$  和  $\beta_0$ 。

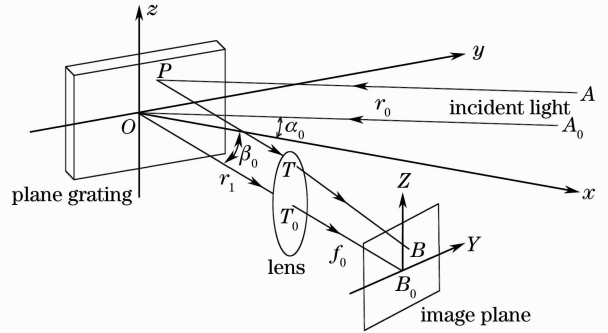


图 1 平面光栅光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of plane grating's optical system

为讨论方便,设平面光栅在不同  $y$  轴位置具有相同的刻线弯曲误差形状,且在不同  $z$  轴位置具有相同的刻线位置误差形状,则刻线弯曲函数  $f(z)$  和刻线位置误差函数  $g(y)$  可表达为

$$\begin{cases} f(z) = \sum_j c_j z^j, & j = 0, 1, 2, \dots, \\ g(y) = \sum_i b_i y^i, & i = 0, 1, 2, \dots. \end{cases} \quad (1)$$

当光栅存在上述的刻线弯曲和刻线位置误差时,光栅刻线数  $n$  为

$$n = [y + g(y) + f(z)]/d, \quad |n| = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

对于光线  $APT$ ,光程函数  $F$  为

$$F = \langle AP \rangle + \langle PT \rangle + nm\lambda, \quad (3)$$

式中  $\langle AP \rangle$  和  $\langle PT \rangle$  分别为  $AP$  和  $PT$  点间的距离, $\lambda$  为入射光波长。

根据费马原理,有

$$\partial F / \partial \omega = 0, \quad \partial F / \partial l = 0. \quad (4)$$

设入射光线  $AP$  和衍射光线  $PT$  的方向余弦分别为  $(L_1, M_1, N_1)$  和  $(L_2, M_2, N_2)$ , 联立(1)~(4)式可得

$$\begin{aligned} L_2 &= \sqrt{L_1^2 + 2M_1 K_w + 2N_1 K_l - K_w^2 - K_l^2}, \\ M_2 &= -M_1 + K_w, \\ N_2 &= -N_1 + K_l, \end{aligned} \quad (5)$$

式中

$$K_w = (1 + \sum_i ib_i \omega^{i-1}) m \lambda / d,$$

$$K_l = (\sum_j jc_j l^{j-1}) m \lambda / d. \quad (6)$$

设线段  $OT_0$  和  $B_0T_0$  的长度分别为  $r_1$  和  $f_0$ ，且像面坐标系中的  $Y$  轴位于  $xy$  平面内， $Z$  轴平行于  $z$  轴，则  $B$  点在像面坐标系坐标为

$$Y_B = (hM_2 - f_0 \sin \beta_0) \sec \beta_0,$$

$$Z_B = hN_2, \quad (7)$$

式中  $h = f_0 / (L_2 \cos \beta_0 + M_2 \sin \beta_0)$ 。根据(7)式可计算出图1所示的光学系统像平面上的点列图，从而对平面光栅含有的弯曲和刻线位置误差对光栅光谱性能的影响进行分析。

光栅的刻线弯曲和刻线位置误差形状可采用衍射波前干涉测量法得到<sup>[17,18]</sup>。图2和图3分别给出了3块由光栅刻划机刻划的、去倾斜和归一化后的光栅统计平均刻线弯曲形状和刻线位置误差形状。根据刻线弯曲和刻线位置误差的实测形状，通过多项式拟合，可得到(1)式和(2)式中的刻线弯曲和刻线位置误差函数。图2中的虚线给出了第一块光栅刻线弯曲形状的多项式拟合结果。

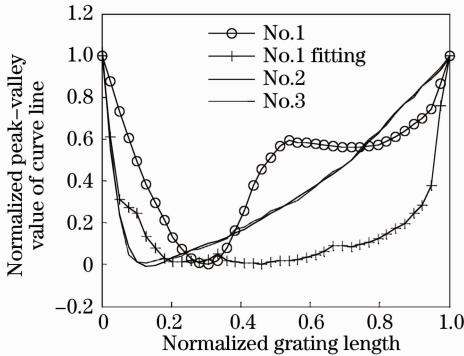


图2 光栅刻线弯曲形状

Fig. 2 Profile of curved grating line

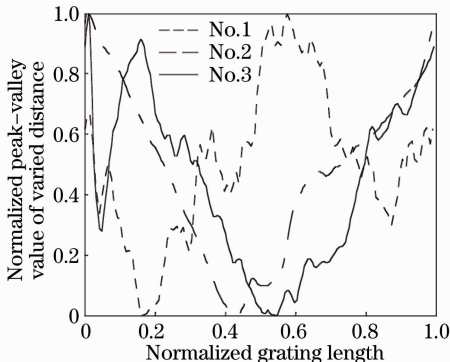


图3 光栅刻线位置误差形状

Fig. 3 Profile of grating's line space error

若考虑光栅刻线误差的一般情况，此时光栅每条刻线弯曲形状与刻线的具体位置有关。设光栅刻线误差可表达为  $U(y, z)$ ，则(5)式中的  $K_w$  和  $K_l$  变为

$$\begin{cases} K_w = (1 + \frac{\partial U}{\partial w}) m \lambda / d, \\ K_l = (\frac{\partial U}{\partial l}) m \lambda / d. \end{cases} \quad (8)$$

根据(5)~(8)式，即可分析光栅任意刻线误差形状对其衍射谱性能的影响，其中刻线误差函数  $U(y, z)$  可根据衍射波前干涉测量法实测得到的刻线误差矩阵进行多项式拟合(如泽尼克系数拟合<sup>[19]</sup>等)得到。

## 2.2 等间距刻线弯曲和刻线位置误差对光栅性能影响分析

根据(7)式分析等间距刻线弯曲对光栅性能的影响，此时  $g(y)$  为零。取光栅常数为  $600 \text{ lp/mm}$ ，入射波长  $\lambda$  为  $300 \text{ nm}$ ，衍射级次  $m = +1$ ，主光线入射角  $\alpha_0$  为  $\pi/6$ ， $r_0$  和  $f_0$  分别为  $300 \text{ mm}$  和  $1000 \text{ mm}$ 。图4给出了根据(7)式计算得到的  $f(z) = k_z z$  时的光栅衍射光线在像面上的点列图位置，随着斜率  $k_z$  的幅值增大，点列图的  $Y$  和  $Z$  轴坐标幅值逐渐增大，且刻线倾斜对弧矢方向的影响远大于对子午方向的影响。图4的物理意义为：当光栅各刻线为直线，但与  $z$  轴夹角在不断变化时(不同的夹角对应不同的斜率  $k_z$ )，单色平行光经该光栅衍射后在像平面仍聚焦为一点，但该点的坐标与斜率  $k_z$  的大小有关。由于等间距刻线弯曲光栅可以等效成若干个光栅刻线方向与  $z$  轴方向存在不同斜率的理想光栅在  $Z$  轴方向拼接而成，因此，刻线弯曲光栅的刻线方向与  $z$  轴斜率  $k_z$  的变化范围决定了其对光栅性能的影响。

由图4可知，对于刻线弯曲形状和峰谷(PV)值

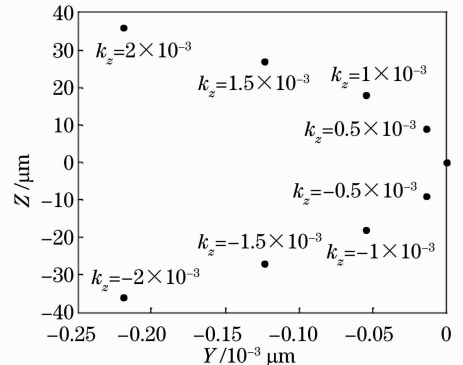


图4 刻线弯曲斜率变化对光栅性能的影响

Fig. 4 Influence of curved-line slope on grating performance

相同的不同尺寸光栅而言,刻线弯曲对光栅性能的影响随着光栅尺寸的增大而降低。这里仅对尺寸为  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$  的光栅进行分析。下面根据(7)式分析当刻线弯曲形状如图2中的曲线 No. 1 所示时,刻线弯曲对光栅分辨本领和杂散光的影响。图5给出了当光栅刻线弯曲导致的衍射波前 PV 值(衍射波前 PV 值为刻线弯曲 PV 值与  $m/d$  的乘积)为  $4\lambda$  时,衍射角变化对像平面点列图的影响。由图5可知,衍射角  $\beta_0$  只影响点列图在理想透镜焦平面上的 Y 轴变化量  $\Delta S_Y$ ,对点列图在 Z 轴的变化量  $\Delta S_Z$  无影响,且衍射角越大,  $\Delta S_Y$  越大。

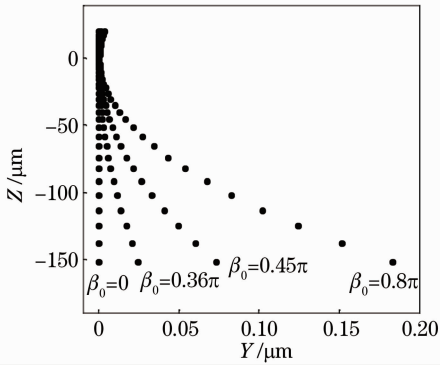


图5  $\beta_0$  对光栅性能的影响

Fig. 5 Influence of  $\beta_0$  on grating performance

图6给出了当光栅衍射波前 PV 值取  $4\lambda$ 、衍射角取  $0.48\pi$ 、焦距  $f_0$  变化时的 Z 轴附近单像元(设像元尺寸为  $30\ \mu\text{m}$ )内的刻线弯曲情况;对于不同焦距  $f_0$  而言,在单像元范围内的刻线弯曲量占像元尺寸的比例均不超过  $0.07\%$ 。考虑到实际光栅任意级次的衍射波前 PV 值一般不超过  $2\lambda$ ,因此即使考虑像元的实际尺寸,刻线弯曲对光栅分辨本领影响仍较小。而且由于当任意给定坐标 Z 时,点列图在 Y 轴的变化量为零,因此刻线弯曲对光栅杂散光无影响。由于图5和图6已涵盖常用的光栅衍射角、

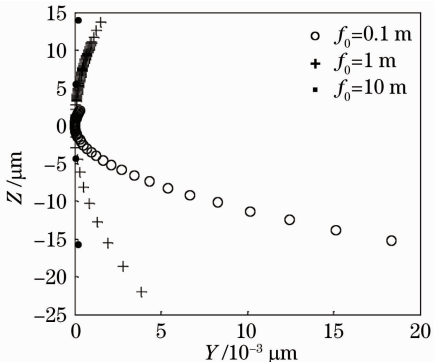


图6  $f_0$  对光栅性能的影响

Fig. 6 Influence of  $f_0$  on grating performance

焦距和衍射波前 PV 值(与  $m\lambda/d$  有关)使用范围,因此本文关于等间距刻线弯曲对光栅性能影响的分析结果对光栅使用而言是具有普遍意义的。

图7考察了根据(7)式得到的  $g(y) = k_y y$  时的光栅衍射光线在像面上的点列图位置,随着斜率  $k_y$  绝对值的增大,点列图的 Y 轴坐标幅值逐渐增大,但点列图在 Z 轴无位移。图7的物理意义为:当光栅的实际栅距与理想栅距存在偏差  $\delta$  时,会使像平面的衍射光位置在子午方向上发生偏移,且偏差  $\delta$  越大,实际衍射光与理想衍射光位置偏移量越大。由图7可知,对于任意光栅衍射角、焦距而言,当刻线位置误差曲线的斜率不断变化时,将影响光栅分辨本领和杂散光等光谱性能,该结论也同样适用于不同刻线密度的平面光栅。

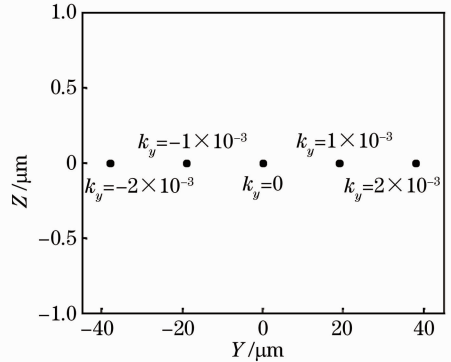


图7 刻线位置误差斜率变化对光栅性能的影响

Fig. 7 Influence of line space error on grating performance

通过上述分析可知,对于含有平面光栅的光学系统而言,若光栅存在刻线弯曲和刻线位置误差,则其对高精度光学系统成像的影响是不可忽视的,因此在对含有平面光栅的高精密或特殊用途的光学系统进行光学设计和分析中,研究光栅刻线弯曲和刻线位置误差的影响是有必要的。以切尔尼-特纳结构光栅光谱仪为例,采用标准光学软件 Code V 分析刻线弯曲和刻线位置误差对光谱仪性能的影响。在该光谱仪中,点光源发出的光线经球面镜1变成平行光,入射至平面光栅表面,经光栅衍射和焦距  $f_0 = 190\text{ mm}$  的球面镜2聚焦后,成像于像平面上。分别分析当平面光栅为理想光栅、只含有刻线位置误差的光栅和只含有等间距刻线弯曲缺陷的光栅时的光谱仪像平面点列图和像差曲线的区别,这里假设刻线弯曲和刻线位置误差的形状相同,且均与图2中光栅 No. 1 的刻线弯曲曲线一致,刻线弯曲光栅和刻线位置误差光栅的衍射波前差均为  $3\lambda$ 。图8给出了通过 Code V 软件光线追迹得到的理想

光栅、含刻线位置误差和刻线弯曲缺陷的光栅在波长为 290 nm 和 290.3 nm 处的点列图,刻线位置误差使光栅像平面上的两个波长点列图在光栅子午方向发生了交叠,从而严重影响了光谱仪分辨本领;而

刻线弯曲光栅对应的两个点列图在光栅子午方向(即 Y 轴方向)分开的距离与理想光栅一致,为  $2.2 \mu\text{m}$ ,因此刻线弯曲光栅没有降低光谱仪分辨本领,仅使点列图在光栅弧矢方向发生展宽。

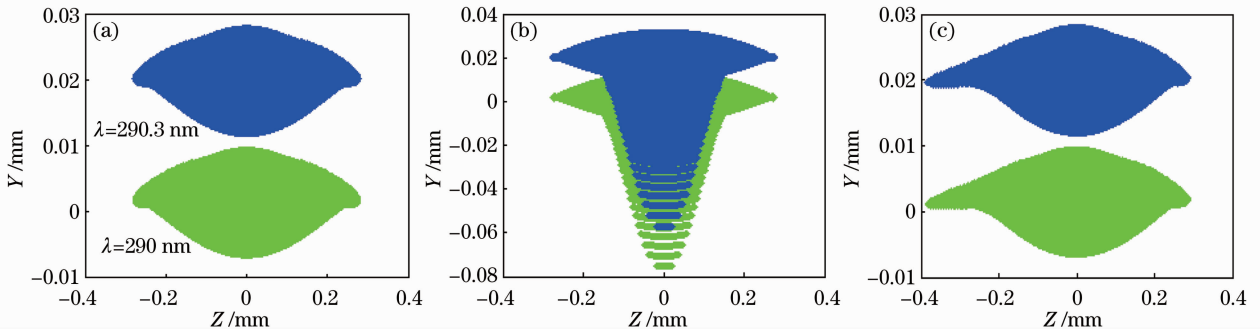


图 8 光栅光谱仪分辨本领分析。(a)理想光栅;(b)含刻线位置误差的光栅;(c)含刻线弯曲缺陷的光栅

Fig. 8 Analysis of grating spectrometer's resolution. (a) Ideal grating; (b) grating with line's location error; (c) grating with line's curve error

图 9 给出了在中心波长为 290 nm 处的、零视场下的上述 3 种光栅对应的光谱仪在光栅子午方向的像差曲线,理想光栅、刻线位置误差光栅和刻线弯曲光栅的像差曲线分别用实线、虚线和实心点表示;理想光栅和刻线弯曲光栅在光栅子午方向的像差曲线几乎完全重合,而刻线位置误差光栅对应的像差曲线明显变差,该结论与采用(7)式的分析结果一致,即刻线弯曲对光栅子午方向的光谱性能影响较小,而刻线位置误差则相反。

如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 2 号刻划机在将隔振条件由海绵隔振变为空气弹簧隔振后,由双频激光干涉仪测得纳米定位工作台在每条刻线刻划过程中产生的刻线位置误差  $3\sigma$  值的最大值由 75 nm 降低至 20 nm 以下;而刻划机分度系统对刻线位置误差的影响分析及修正方法,在文献[20]中已有相关介绍。本文将主要介绍光栅刻划机刻划系统的机械修正方法,用以减少刻划系统造成的刻线局部位位置误差。

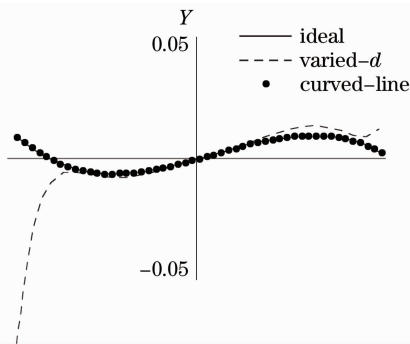


图 9 非理想光栅光谱仪像差对比曲线

Fig. 9 Aberration contrast curves of non-ideal grating spectrometer

### 3 修正方法及实验分析

根据(7)式进行数值仿真可知,等间距刻线弯曲对光栅杂散光影响较小,因此为进一步提高光栅质量,应着重研究刻线位置误差的产生原因及其修正方法。刻线位置误差主要由光栅刻划机刻划系统、分度系统及外界环境条件(温度、湿度和振动等)导致。改善外界环境条件,可有效降低光栅刻线误差,

在大光栅刻划机项目中,先以中国科学院长春光学精密机械与物理研究所最大刻划面积为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的 2 号刻划机为原理样机进行实验和刻线误差修正,再将其成功经验应用于最大刻划面积为  $420 \text{ mm} \times 660 \text{ mm}$  的大光栅研制中。图 10 给出了 2 号机刻划系统示意图,其主要工作原理为:由刻划电机带动曲柄转动,从而使曲柄连杆通过铜滑块和推拉杆带动鞍型滑块在石英导轨上做往复运动。鞍型滑块一侧安装着刀架及金刚石刀,鞍型滑块与铜滑块之间采用双关节轴承连杆进行连接。2 号机工作于间歇刻划模式,即由分度系统先运动光栅常数距离,接着分度系统保持位置不变,刻划系统在鞍型滑块回程时落刀刻划,分度系统和刻划系统不断重复上述操作。

图 11 给出了 2 号机刻划系统修正之前的鞍型滑块和刀架安装结构图,此时安装板与鞍型滑块之间直接进行固定连接。当刻划系统处于理想条件下,即不存在装调误差、导轨直线性误差等误差因素时,鞍型滑块刀架侧的 3 个刚性滑脚在鞍型滑块另

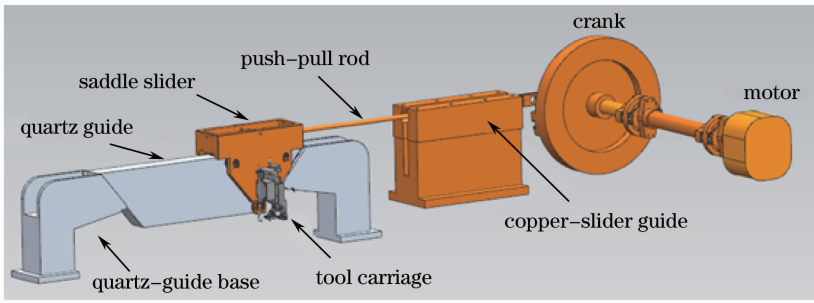


图 10 光栅刻划机刻划系统示意图

Fig. 10 Schematic of ruling system of grating ruling machine

一侧的 3 个带有弹簧封闭力的弹性滑脚的作用下,将与石英导轨侧面接触(鞍型滑块上侧有 2 个刚性滑脚,刀架侧有 3 个刚性滑脚,与刀架侧相对的一侧有 3 个弹性滑脚)。图 12 考察了采用 ZYGO 波前测量干涉仪得到的、刻划系统修正前的 600 lp/mm 光栅(刻划面积为  $68\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,其中各刻线长度为  $68\text{ mm}$ )统计平均刻线形状情况<sup>[17]</sup>,给出了光栅归一化宽度两端和中部的典型刻线形状、光栅平均刻线形状以及平均刻线形状的  $3\sigma$  值范围,横坐标为光栅归一化长度(这里定义光栅长度方向为刻划方向),光栅平均刻线形状  $3\sigma$  值的平均值、最大值和最小值分别为  $26.5, 57.2, 8.6\text{ nm}$ 。图 13 考察了采用  $532\text{ nm}$  激光器照射光栅表面,得到的光栅-2 级和-3 级衍射光及两个级次间的杂散光分布,该光栅存在较大的杂散光,两个衍射级次间的杂散光已连成一条亮线。

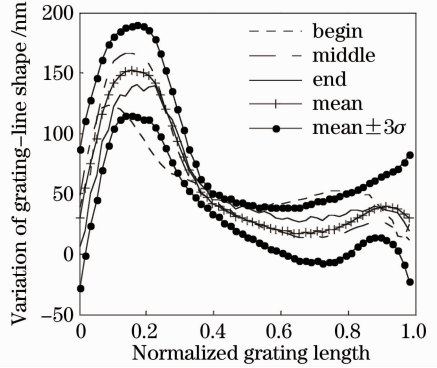


图 12 修正前的光栅刻线形状

Fig. 12 Grating line shape before modification

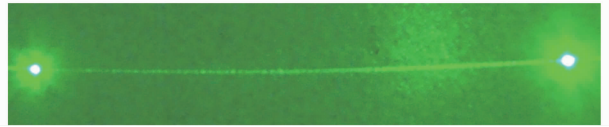


图 13 修正前的光栅衍射光

Fig. 13 Grating diffraction light before modification

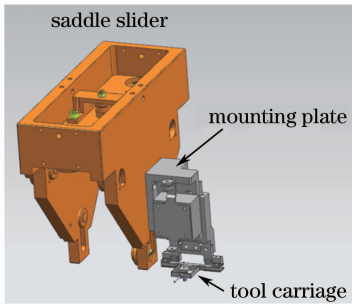


图 11 修正前的鞍型滑块结构

Fig. 11 Structure of saddle slider before modification

修正前的刻划系统存在较大杂散光的主要原因是刻划系统是一个非线性的弹性系统且其运行状态不能达到上文所述的理想状态,因此导致鞍型滑块在刀架侧的 3 个滑脚不能在任意时刻均与石英导轨相接触,从而使金刚石刀运动轨迹产生了较大随机性误差,即刻线形状存在不重复性误差。刻线形状的不重复性误差使光栅刻线位置发生局部变化,进而导致光栅杂散光较强。

鉴于此,修正了鞍型滑块与安装板间的连接方式(见图 14 所示),将原有的固定连接改为柔性铰链式连接,通过调整图 14 中滑脚后面的垫片厚度来使安装板上的滑脚以一定的初始封闭力与石英导轨接触,从而确保安装板上的滑脚能够在鞍形滑块运动的任意时刻都与石英导轨保持接触,因此实现了金刚石刀以石英导轨为导向面进行光栅刻划。图 15 考察了采用 ZYGO 波前测量干涉仪得到的、刻划系统修正后的 600 lp/mm 光栅(刻划面积同上)归一化宽度两端和中部的典型刻线形状、光栅平均刻线形状以及平均刻线形状的  $3\sigma$  值范围,刻划系统修正后的光栅平均刻线形状  $3\sigma$  值的平均值、最大值和最小值分别为  $8.7, 24.6, 1.7\text{ nm}$ ,其幅值降低至修正前的光栅平均刻线形状  $3\sigma$  值的一半以下,由于光栅刻线形状不重复导致的光栅局部刻线位置显著下降。图 16 考察了采用  $532\text{ nm}$  激光器照射光栅表面,得到的光栅-2 级和-3 级衍射光及两个级次间

的杂散光分布,修正后的刻划系统对光栅杂散光水平有明显抑制作用。

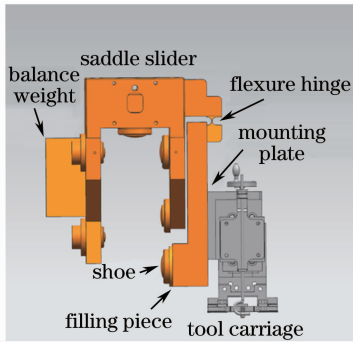


图 14 修正后的鞍型滑块结构

Fig. 14 Structure of saddle slider after modification

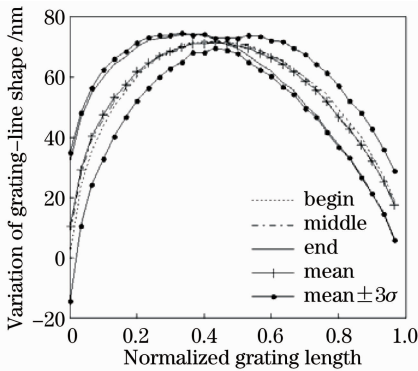


图 15 修正后的光栅刻线形状

Fig. 15 Grating line shape after modification

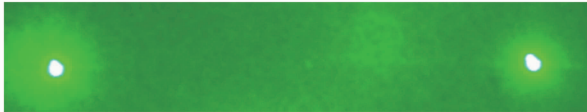


图 16 刻划系统修正后的光栅衍射光

Fig. 16 Grating diffraction light after modification

虽然刻划系统修正后光栅质量已比刻划系统修正前有明显提高,但刻线局部位置误差仍较大,因此在后续的研究中将继续对刻划系统进行修正,以减少刻线局部位置误差对光栅质量的影响。此外,也可采用闭环控制的方法修正光栅刻线误差,即根据纳米位移传感器测得的刻线局部位置误差幅值来实时调节纳米定位工作台或刻划刀架,从而实现刻线误差的实时补偿,该方法的实现方案正在设计中。

## 4 结 论

建立了含有刻线弯曲和刻线位置误差的非理想机刻光栅的光线追迹模型,分析了不同衍射角、焦距和波前 PV 值时的刻线弯曲和刻线位置误差对光栅光谱性能的影响。将非理想光栅引入到实际的光学系统中,研究了非理想光栅对光谱仪分辨本领和像

差的影响。结果表明:1) 等间距刻线弯曲主要影响光栅弧矢方向的光谱性能,而对光栅杂散光、分辨本领等光谱性能影响较小;刻线位置误差则严重影响光栅子午方向的光谱性能;2) 在包含平面光栅的光谱仪器的光学设计和优化中,应将非理想光栅模型带入到实际光学系统中,进行分析和补偿,以便得到最佳优化和补偿效果;3) 在光栅刻划机研制中,应减小光栅刻线位置误差、改善光栅在子午方向的光谱性能;此外,由于近年来随着中阶梯光栅光谱仪以及激光脉冲压缩等技术的发展,对光栅弧矢方向性能提出了新的要求,因此在解决光栅刻线位置误差问题基础上,应采取适当方案(如增大刀架导轨刚度、进行闭环控制补偿等)减小刻线弯曲,使大尺寸机刻光栅更好地适应新技术发展需求。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Lei, Shurong Wang, Qu Yi *et al.*. Study on spectral broadband aberration-corrected imaging spectrometer for far-ultraviolet waveband[J]. *Opt. Eng.*, 2011, **50**(6): 063002
- 2 F. M. Gerasimov. Use of diffraction gratings for controlling a ruling engine[J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(11): 1861~1865
- 3 Yu Lei, Qu Yi, Lin Guanyu *et al.*. Design and study of an optical system for a far ultraviolet imaging spectrograph in 120~180 nm carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112011
- 于磊, 曲艺, 林冠宇等. 120~180 nm 星载远紫外电离层成像光谱仪光学系统设计与研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112011
- 4 George R. Harrison, Stephen W. Thompson. Large diffraction gratings ruled on a commercial measuring machine controlled interferometrically[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1970, **60**(5): 591~595
- 5 Han Jian, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Profile evolution of grating masks according to exposure dose and interference fringe contrast in the fabrication of holographic grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0305001
- 韩建, 巴音贺希格, 李文昊等. 全息光栅制作中光栅掩模形状随曝光量及干涉场条纹对比度的变化规律[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0305001
- 6 Koshi Takashima, Shigenori Nawata. Diffraction grating ruling engine with piezoelectric control[J]. *Japan. J. A. P.*, 1978, **17**(8): 1445~1446
- 7 I. R. Bartlett, P. C. Wildy. Diffraction grating ruling engine with piezoelectric drive[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(1): 1~3
- 8 George R. Harrison, George W. Stroke. Interferometric control of grating ruling with continuous carriage advance[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1955, **45**(2): 112~120
- 9 Harold D. Babcock, Horace W. Babcock. The ruling of diffraction gratings at the mount Wilson observatory[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1951, **41**(11): 776~786
- 10 Georger Harrison, James E. Archer. Interferometric calibration of precision screws and control of ruling engines[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1951, **41**(8): 495~502
- 11 M. C. Hutley. *Diffraction Grating* [M]. London: Academic Press, 1982. 91~94
- 12 S. Yokozeki, S. Sawa. Interferometric testing of grating using Moire method[J]. *Japan J. A. P.*, 1975, **14**(1): 465~470

- 13 G. W. Stroke. Attainment of high-resolution gratings by ruling under interferometric control[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1961, **51**(12): 1321~1339
- 14 George R. Harrison. The diffraction grating-an opinionated appraisal[J]. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(9): 2039~2048
- 15 H. Noda, T. Namioka, M. Seya. Ray tracing through holographic gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1037~1041
- 16 Kong Peng, Tang Yuguo, Bayanheshig *et al.*. Compensation effects between parameter errors of flat-field holographic concave gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0705001  
孔 鹏, 唐玉国, 巴音贺希格 等. 平场全息凹面光栅结构参量误差之间的补偿作用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0705001
- 17 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[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
- 18 Zhu Xiangbing, He Shiping, Fu Shaojun *et al.*. Measurement of the line-density of a varied-line-space grating by Moire fringe[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3): 286~288  
朱向冰, 何世平, 付绍军 等. 云纹法检测变线距光栅的线密度[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(3): 286~288
- 19 Yu Haili, Qi Xiangdong, Bayanheshig *et al.*. Solving resolution of diffraction gratings using coefficients of Zernike polynomials[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(1): 264~267  
于海利, 齐向东, 巴音贺希格 等. 利用泽尼克系数求取衍射光栅的分辨本领[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(1): 264~267
- 20 Yu Haili. Research a 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. 77~83  
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. 77~83

栏目编辑: 李文喆