

# 光栅刻划机阿贝误差对光栅衍射波前质量的影响及其校正方法

糜小涛<sup>1,2</sup>, 于海利<sup>1</sup>, 于宏柱<sup>1</sup>, 齐向东<sup>1</sup>, 李晓天<sup>1</sup>, 万秋华<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** 衍射波前质量是衡量刻划光栅性能的重要指标之一, 光栅刻划机若存在阿贝误差, 将直接影响刻线位置精度, 从而影响光栅的波前质量。建立了刻划机阿贝误差与光栅衍射波前质量的物理模型, 并分析了该误差对波前质量的影响。针对该误差设计了一种基于双频激光干涉测量的阿贝误差测量光路, 测量了刻划机的阿贝误差, 根据物理模型对其导致的光栅衍射波前误差作了仿真分析, 并提出了基于双层工作台结构的误差控制校正方法。对两块尺寸为 80 mm×100 mm、刻线密度为 79 groove/mm 的中阶梯光栅进行了阿贝误差校正前后的对比刻划实验。结果表明, 通过对阿贝误差的测量和校正, 光栅闪耀级次为 -36 级的衍射波前误差由 0.529λ 降低至 0.159λ (λ=632.8 nm), 有效地降低了阿贝误差对光栅衍射波前质量的影响。

**关键词** 衍射光栅; 阿贝误差; 衍射波前; 刻线位置误差; 刻划机

中图分类号 TH113.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0904001

## Influence and Revising Method of Grating Ruling Engine's Abbe Error on Quality of Grating Wavefront

Mi Xiaotao<sup>1,2</sup>, Yu Haili<sup>1</sup>, Yu Hongzhu<sup>1</sup>, Qi Xiangdong<sup>1</sup>, Li Xiaotian<sup>1</sup>, Wan Qiuhua<sup>1</sup>

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

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

**Abstract** Diffracted wavefront quality is one of the important performance indexes of gratings. If there is Abbe error in the grating ruling engine, it will directly affect the positioning accuracy of grooves, thus affecting wavefront quality of gratings. The physical models of the Abbe error and the quality of the grating diffraction wave are established, to analyze the influence of the error on the wavefront quality. Aiming at the Abbe error, a kind of measurement optical path is designed based on dual-frequency laser interferometry, and the influence of Abbe error on diffracted wavefront of the grating is measured and simulated. Furthermore, the error control method based on double-layer grating table structure is proposed. Before and after revising Abbe error, the ruling experiments for two echelle gratings with the size of 80 mm×100 mm and groove density of 79 groove/mm are carried out. The results show that the diffracted wavefront error of the gratings in -36 blaze order is reduced from 0.529λ to 0.159λ (λ=632.8 nm) by the measurement and correction of the Abbe error, which effectively reduces the influence of Abbe error on the quality of grating's diffracted wavefront.

收稿日期: 2017-03-29; 收到修改稿日期: 2017-05-21

基金项目: 国家 973 计划 (2014CB049500)、国家自然科学基金 (61605204)、重大科学仪器设备开发专项 (2016YFF0103304)

作者简介: 糜小涛(1988—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事衍射光栅及衍射光栅刻划机方面的研究。

E-mail: mixiaotao\_ciomp@126.com

导师简介: 万秋华(1962—), 女, 博士, 研究员, 主要从事光电位移精密测量技术、电子科学与技术方面的研究。

E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn

**Key words** diffraction gratings; Abbe error; diffracted wavefront; error of groove position; ruling engine

**OCIS codes** 050.1950;050.1940; 050.2770; 120.5050

# 1 引 言

衍射光栅是一种纳米级精度的、周期性浮雕结构的分光元件,其制作方法包括机械刻划、全息离子束刻蚀等<sup>[1-3]</sup>,广泛应用于各类光谱仪器中<sup>[4-9]</sup>。光栅的衍射波前质量直接影响光栅的分辨本领和光谱成像质量,进而影响光谱仪的性能<sup>[10-12]</sup>。

衍射光栅刻划机是制作刻划光栅的母机,由承载光栅毛坯的分度系统和安装金刚石刻刀的刻划系统两部分组成。刻划光栅是由往复运行的金刚石刻刀在单向运行的光栅毛坯上挤压成型。光栅刻划机关键零部件的加工、整机的装调以及系统的测量等,都可能会引起刻划光栅的刻线误差,进而影响光栅的波前质量<sup>[13]</sup>。早期光栅刻划机均为纯机械式,刻线误差大,刻划精度低,衍射波前质量差。随着干涉测量技术和微位移技术的发展,及其在光栅刻划机上的应用,刻划光栅的精度得到了巨大的提高<sup>[14]</sup>。美国的 MIT-C 机,采用了激光干涉测量装置,宏-微双重定位系统,差动轮系作为微定位执行器件,有效地校正了分度系统机械结构和测量等引起的误差,提高了刻线精度,实现了波前质量优于  $\lambda/3$  的 350 mm×450 mm 大面积中阶梯光栅的刻划<sup>[15-16]</sup>。日本 Hitachi 刻划机,采用了双频激光干涉仪作为测量元件,伺服电机和压电陶瓷分别作为宏-微定位的驱动元件,定位误差可达 5 nm,刻线位置精度高,光栅的各指标性能好<sup>[17-18]</sup>。为了进一步提高我国刻划光栅的波前质量,根据中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的刻划面积可达 400 mm×500 mm 的大面积高精度衍射光栅刻划机 Ciomp-6(以下简称 Ciomp-6)的机械结构和测量光路的特点,分析了测量阿贝误差产生的原因及其对刻线误差和波前质量的影响,提出了该误差的测量方法,测量了刻划机的阿贝误差,对其导致的光栅衍射波前误差作了仿真分析,并提出阿贝误差的校正方法。进行了阿贝误差校正前后尺寸为 80 mm×100 mm、刻线密度为 79 groove/mm 的中阶梯光栅对比实验,验证了阿贝误差的校正结果。

## 2 刻划机测量阿贝误差与光栅衍射波前质量的物理模型

### 2.1 分度系统工作原理

Ciomp-6 分度系统采用了宏-微两重定位过程,其中宏定位过程是通过蜗轮蜗杆副和丝杠螺母副将分度电机所要旋转的角度转化为载有光栅基底的双层工作台机构在导轨副上的所要行走的位移,从而实现光栅刻线位置的粗定位。微定位过程主要是由如图 1 所示的双层工作台完成,承载光栅基地的内层台 2 是通过 4 个平行的弹簧钢片 5 悬挂连接在外层台 1 上,内层台和外层台之间安装有两个沿分度方向运动的压电触电器 3(压电陶瓷,PZT),并通过拉簧 4 提供内外台的初始封闭力,控制两端压电触电器 3 伸长量,进而实现分度系统的微定位过程。

Ciomp-6 采用双频激光干涉仪作为测量元件,测量光路如图 2 所示。双频激光器 1 发出的光被 50%分

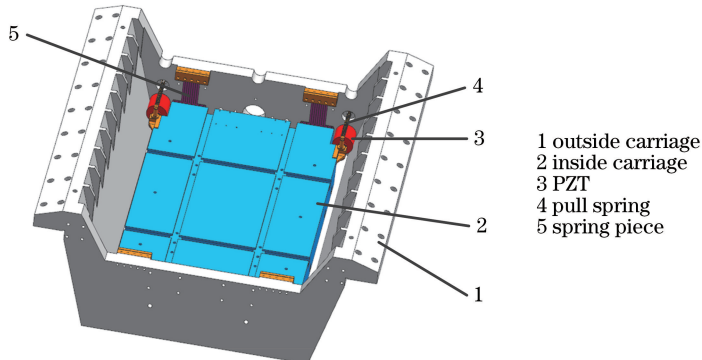


图 1 工作台结构三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of table structure

光镜 2 分为两束,一束经由干涉仪 4 直接入射到测量镜 6,另一束通过折转镜 3 经由干涉仪 4 直接入射到测量镜 6。光路的参考镜分别集成在两个干涉仪中,参考镜位置不变,当测量镜 6 随着内层台 7 沿分度方向运行时,将产生多普勒效应,测量光束叠加频移量  $\Delta f$  被接收器接收并转换为测量信号,测量信号与参考信号经数字运算处理器处理。由计数器产生的脉冲计数个数为  $N$ ,则测量光束所得的位移量为

$$L = \frac{\lambda}{4} \int_0^t \Delta f dt = \frac{N\lambda}{4} \quad (1)$$

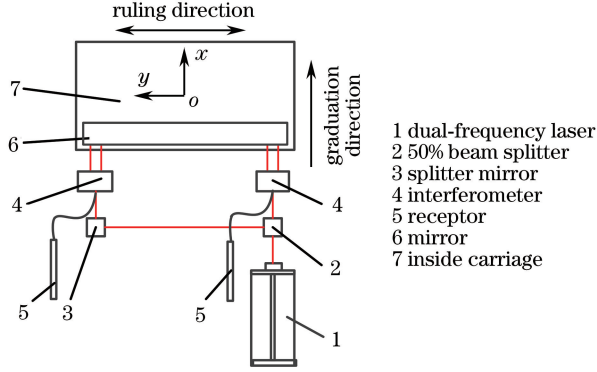


图 2 测量光路

Fig. 2 Optical path for measurement

刻线误差校正原理如图 3 所示,设在  $y$  方向两压电驱动器的驱动轴距离为  $a$ ,两测量光束的中心轴距离为  $b$ ,刻划时刻线任一位置  $i$ ,两束光测得的实际位置距理想位置的位移大小分别为  $l_{i1}$  和  $l_{i2}$ ,则两压电陶瓷的伸缩量分别为  $l_{z1}$  和  $l_{z2}$ 。

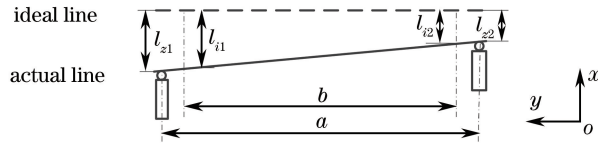


图 3 刻线误差校正原理图

Fig. 3 Schematic of revising on error of grooves

由几何关系可求得

$$\begin{cases} l_{z1} = \frac{l_{i1}(2a + b) - l_{i2}(2a - b)}{4b} \\ l_{z2} = \frac{l_{i2}(2a + b) - l_{i1}(2a - b)}{4b} \end{cases} \quad (2)$$

通过双频激光干涉测量反馈和宏-微两重定位,构成了分度系统的闭环控制,有效地提高了系统的定位精度,减少了分度系统机械零部件的加工、装调以及分度导轨水平方向直线度等带来的光栅刻线误差,改善了刻划光栅的质量。

### 2.2 阿贝误差的来源

Ciomp-6 的刻划系统是开环控制系统,其引起的刻线误差优先通过合理的结构来减小,测量系统  $y$  向示意图如图 4 所示,为了减小由气浮导轨 7 的动导轨绕静导轨的偏转引起的刻线误差,需尽可能减小小金刚石刻刀相对气浮导轨回转中心的距离,在  $z$  方向上光栅刻划平面尽可能靠近气浮导轨下端面<sup>[3]</sup>。此外,测量镜 5 在分度方向上要通过气浮导轨 7 的下端面,则  $z$  方向上测量镜 5 的上端面基本与光栅刻划平面平齐,考虑到测量光斑的直径、测量镜 5 的边缘倒角、面型等边缘效应,测量光路一般选择测量镜 5 面型好的中部区域。因此,两测量光束组成的平面(测量平面)与光栅刻划平面(刻划平面)在  $z$  方向上存在位移  $l$ 。

阿贝误差原理图如图 5 所示,假设刻划时刻线任一位置  $i$ ,分度导轨垂直方向直线度为  $\alpha_i$ ,测量平面内两光束测得的刻线位置误差分别为  $l_{i1}$  和  $l_{i2}$ ,而实际刻划平面内的刻线位置误差为  $\eta_{i1}$  和  $\eta_{i2}$ ,则阿贝误差为

$$\delta = \eta_{i1} - l_{i1} = \eta_{i2} - l_{i2} = l \times \tan \alpha_i \quad (3)$$

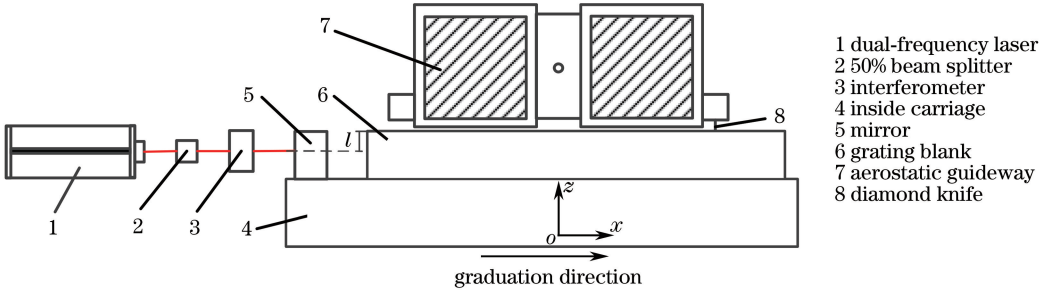


图 4 测量系统  $y$  向示意图

Fig. 4 Schematic of measuring system in  $y$  direction

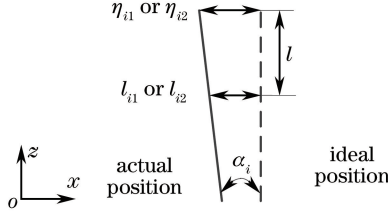


图 5 阿贝误差原理图

Fig. 5 Schematic of Abbe error

### 2.3 阿贝误差对光栅波前质量的影响

光栅刻划机刻划系统按工作方式的不同分为连续刻划和间歇刻划两种。连续刻划是指分度系统以均匀的速度沿分度方向缓慢运行,刻线的每一点都会受不同阿贝误差的影响;间歇刻划是指刻划系统刻划时分度系统停止运行,刻划系统回程时分度系统分度,每条刻线上的每一点的阿贝误差相同。因此,从阿贝误差对刻线位置误差影响的角度上看,间歇刻划是连续刻划的特殊情况。

假设刻划系统的工作方式为连续刻划,刻线数为  $n$ , 每条刻线进行等间隔的  $m (m > n)$  采样,则由阿贝误差导致的整块光栅的刻线位置误差为

$$\boldsymbol{\delta}_{nm} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{21} & \cdots & \delta_{n1} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{1m} & \delta_{2m} & \cdots & \delta_{nm} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

则入射光经过光栅衍射后产生的光程差为

$$\boldsymbol{\xi} = (\sin \theta_{ak} + \sin \theta_{bk}) \boldsymbol{\delta}_{nm}, \quad (5)$$

式中  $\theta_{ak}$  为  $k$  级次的入射角,  $\theta_{bk}$  为  $k$  级次的衍射角,  $k$  为衍射级次。

光栅方程为

$$d \times (\sin \theta_{ak} + \sin \theta_{bk}) = k\lambda, \quad (6)$$

式中  $d$  为光栅常数,  $\lambda$  为入射光波长。

将(6)式代入(5)式可得阿贝误差引起的光栅波前差为

$$\boldsymbol{\Delta} = \frac{k}{d} \boldsymbol{\delta}_{nm} = \frac{k}{d} \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{21} & \cdots & \delta_{n1} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{1m} & \delta_{2m} & \cdots & \delta_{nm} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Ciomp-6 采用的是间歇刻划方式,则

$$\begin{cases} \delta_{11} = \delta_{12} = \cdots = \delta_{1m} \\ \delta_{21} = \delta_{22} = \cdots = \delta_{2m} \\ \vdots \\ \delta_{n1} = \delta_{n2} = \cdots = \delta_{nm} \end{cases}. \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式,则间歇刻划方式下阿贝误差引起的光栅波前差为

$$\Delta_1 = \frac{k}{d} \delta_{nm} = \frac{k}{d} \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{nm} \\ \delta_{11} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{nm} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{11} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

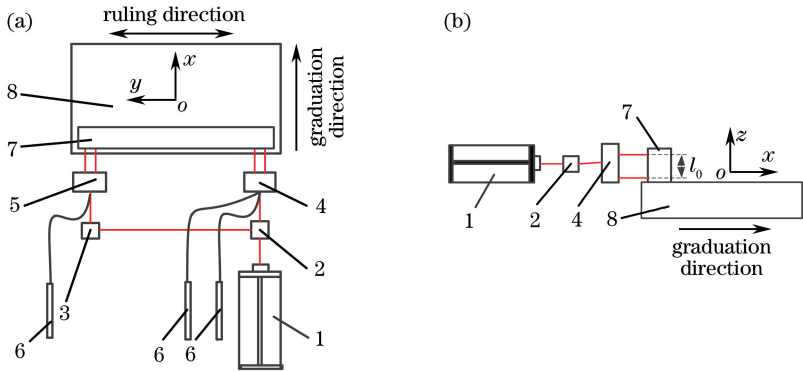
由(7)式和(9)式可知,在相同的  $\delta_{nm}$  下,光栅波前差与衍射级次成正比,与光栅常数成反比,即与刻线密度成正比。

### 3 刻划机阿贝误差的测量、仿真分析和校正

由第 2 节分析可知,Ciomp-6 现有的测量系统和机械结构,测量平面和刻划平面不可能重合,阿贝误差必然存在。为了分析阿贝误差对刻线位置误差和光栅衍射波前的影响,本文提出了阿贝误差的测量方法,设计了测量光路,测量了阿贝误差并对之进行仿真分析,最后提出了阿贝误差的校正方法。

#### 3.1 阿贝误差的测量和仿真分析

具有阿贝误差测量功能的测量光路如图 6 所示。与图 2 测量光路相比较,干涉仪 A 4 具有角度测量功能,即进入干涉仪 A 4 的光束,被分为两路位移测量光束,其中一路测量光束与只具有位移测量功能的干涉仪 B 5 的测量光束构成原来的测量平面,另一路测量光束在  $z$  轴上与测量平面相距  $l_0$ 。



1 dual-frequency laser; 2 50% beam splitter; 3 splitter mirror; 4 interferometer A with angle measuring function; 5 interferometer B with displacement measuring function; 6 receptor; 7 mirror; 8 inside carriage

图 6 具有阿贝误差测量功能的测量光路。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 6 Measuring optical path with a function of Abbe error measurement. (a) Top view; (b) side view

假设刻划时刻线任一位置  $i$ ,分度导轨垂直方向直线度为  $\alpha_i$ ,角度  $\alpha_i$  的测量原理图如图 7 所示,干涉仪 A 4 上、下两束测量光路测得的位移分别为  $l_{i2}$  和  $l_{i3}$ ,则角度  $\alpha_i$  为

$$\alpha_i = \arctan[(l_{i2} - l_{i3})/l_0] \quad (10)$$

联立(3)式和(10)式可得阿贝误差为

$$\delta = l[(l_{i2} - l_{i3})/l_0] \quad (11)$$

基于具有阿贝误差测量功能的测量光路,采用干涉仪 4 测量了分度系统连续运行全行程 500 mm 的阿贝误差,如图 8 所示。

由于分度导轨垂直方向的直线度和圆柱滚珠的影响,分度系统阿贝误差呈现如图 8 所示的周期性,波前误差值  $d_{PV}$  为 363 nm。

考虑到 Ciomp-6 为间歇刻划方式,对测得的数据每隔光栅常数进行采样,得  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 。

对每条刻线进行等间隔  $m (m > n)$  采样,光栅刻划时工作台静止,每条刻线  $\delta$  值相同,则扩展到整个光栅平面上有

$$\delta_{nm} = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_n \\ \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

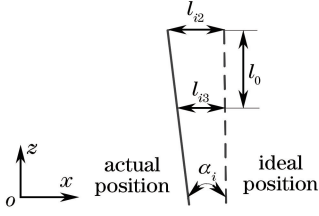


图 7 角度  $\alpha_i$  的测量原理图

Fig. 7 Schematic of measuring angle  $\alpha_i$

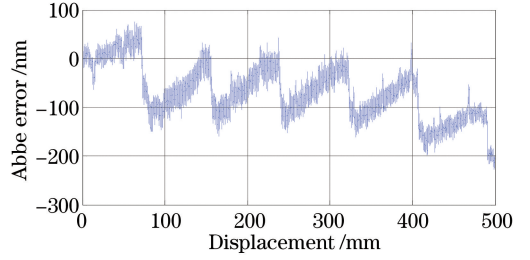


图 8 分度系统的阿贝误差

Fig. 8 Abbe error of indexing system

将(12)式代入(9)式的物理模型中,则有

$$\Delta_1 = \frac{k}{d} \delta_{nm} = \frac{k}{d} \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_n \\ \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

由(13)式可知,阿贝误差对光栅的波前质量影响与光栅的衍射级次  $k$  成正比,与光栅的常数  $d$  成反比。将第 4 节对比刻划实验所在位置的阿贝误差代入物理模型(13)式中,对 600 groove/mm 的常规光栅、79 groove/mm 的中阶梯光栅和 6000 groove/mm 的高刻线密度光栅进行仿真分析,得出如图 9 所示的光栅波前质量图和表 1 所示光栅的波前误差值  $d_{PV}$ 。

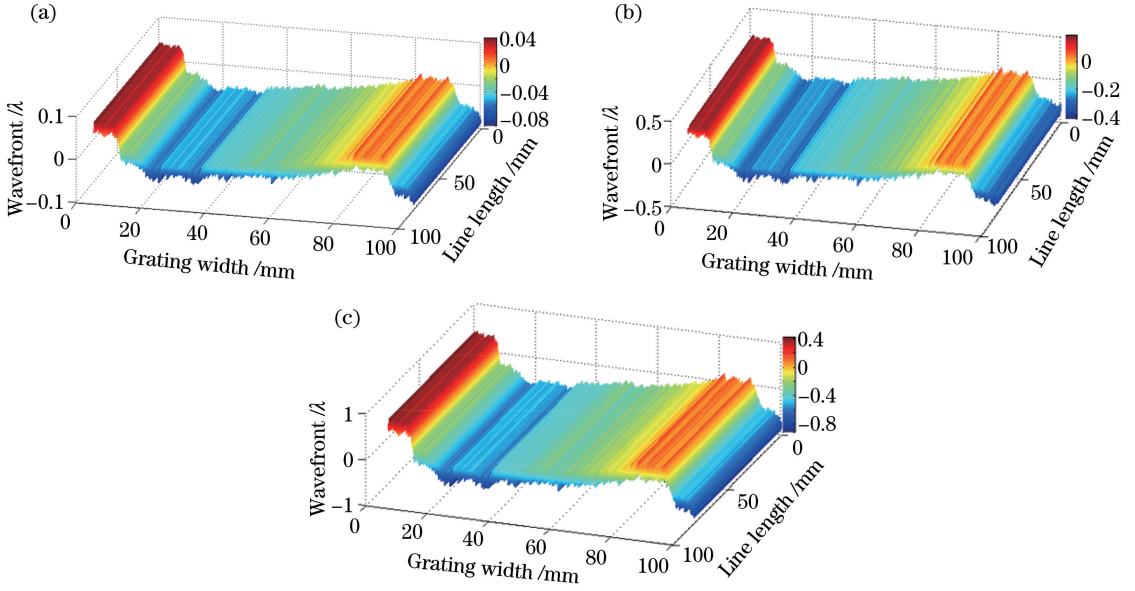


图 9 阿贝误差对不同刻线密度光栅波前质量的影响。(a) 600 groove/mm; (b) 79 groove/mm; (c) 6000 groove/mm

Fig. 9 Impact of Abbe error on grating wavefront quality of different groove densities.

(a) 600 groove/mm; (b) 79 groove/mm; (c) 6000 groove/mm

表 1 阿贝误差对不同刻线密度光栅产生的波前误差值  $d_{PV}$

Table 1 Wavefront error value  $d_{PV}$  of Abbe error on grating wavefront quality of different groove densities

Density /(groove/mm)	Diffraction order	$d_{PV} / \lambda$
600	-1	0.13371
79	-36	0.6127
6000	-1	1.3371

由物理模型(13)式、图 9 和表 1 可知,阿贝误差对光栅的波前质量产生较大的影响,随着光栅使用级次的增加或刻线密度的增大,阿贝误差对波前质量的影响加大。为了进一步提高光栅的波前质量,必须进行阿贝误差的校正。

### 3.2 阿贝误差的校正

由图 3 刻线误差校正原理、图 5 阿贝误差原理图和(2)式、(3)式、(11)式可得,实际刻划平面的刻线位置误差为

$$\begin{cases} \eta_{i1} = l_{i1} + l[(l_{i2} - l_{i3})/l_0] \\ \eta_{i2} = l_{i2} + l[(l_{i2} - l_{i3})/l_0]^\circ \end{cases} \quad (14)$$

为了校正阿贝误差,(2)式中测量平面内的刻线位置误差  $l_{i1}$  和  $l_{i2}$  应替代成实际刻划平面内的刻线位置误差  $\eta_{i1}$  和  $\eta_{i2}$ ,则压电陶瓷的的伸缩量为

$$\begin{cases} l'_{z1} = \frac{\eta_{i1}(2a + b) - \eta_{i2}(2a - b)}{4b} \\ l'_{z2} = \frac{\eta_{i2}(2a + b) - \eta_{i1}(2a - b)}{4b}^\circ \end{cases} \quad (15)$$

## 4 光栅刻划实验

为了验证上述阿贝误差的测量和校正方法对光栅波前质量的效果,在阿贝误差校正前后分别刻划了  $80 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的 79 groove/mm 中阶梯光栅。为了减小其他因素的影响,使实验结果更具有说服力,该刻划实验需具备以下条件:

- 1) 两光栅设计参数相同,其中闪耀波长为  $632.8 \text{ nm}$ ,闪耀级次为  $-36$  级,衍射角为  $64.14^\circ$ 。
- 2) 两块光栅基地尺寸均为  $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,刻划区域内光栅基地面型误差优于  $0.1\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ );
- 3) 两块光栅基地上铝膜在一次镀膜实验中同时镀出,铝膜力学性能相同,测得厚度均为  $11.6 \mu\text{m}$ ;
- 4) 相对于刻划机而言,两块光栅的刻划区域位置相同,两次刻划速度一致、刻刀参数相同。

运用 Zygo 干涉仪分别测量了两光栅闪耀级次为  $-36$  级的波前质量,如图 10 所示。

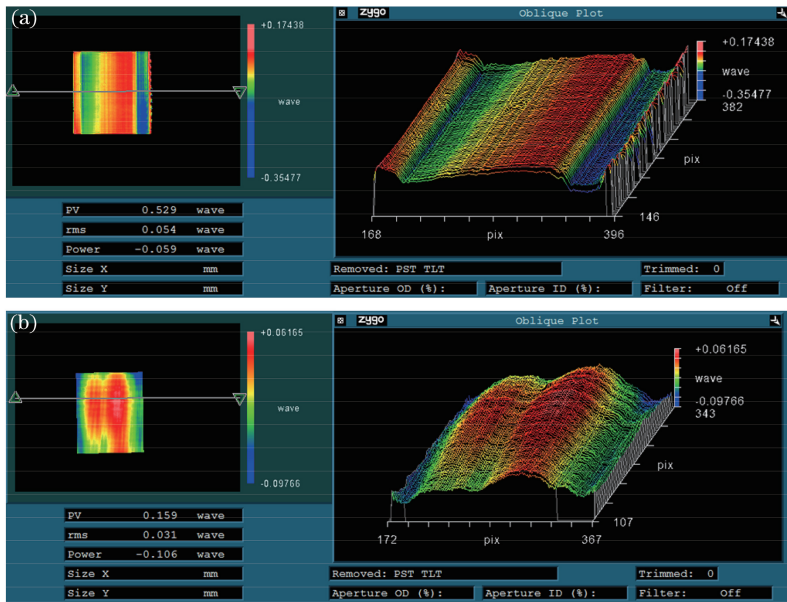


图 10 Zygo 干涉仪测量的光栅波前质量。(a)校正阿贝误差前;(b)校正阿贝误差后

Fig. 10 Wavefront quality of the grating measured by Zygo interferometer. (a) Before revising Abbe error; (b) after revising Abbe error

由表 1、图 9(b)和图 10(a)可知,阿贝误差模型仿真分析建立的光栅波前质量和光栅刻划实验测得的光栅波前质量,形貌相似,表明上述理论分析的正确性,但两者数值不同,主要是由于仿真分析考虑因素少,没有考虑刻划机其他因素对光栅波前质量的影响。

由图 10(a)和图 10(b)对比可知,阿贝误差校正前,光栅衍射级次为  $-36$  级的波前差为  $0.529\lambda$ ,校正后

波前降为  $0.159\lambda$ , 波前质量提高了 70%, 由此表明, 本文提出的波前误差测量和校正方法有效地提高了光栅的波前质量。

## 5 结 论

根据 Ciomp-6 机械结构和测量光路的特点, 分析了阿贝误差产生的原因及其对光栅波前质量的影响, 提出了该误差的测量方法和校正方法, 进行了阿贝误差测量、仿真分析和误差补偿前后光栅刻划对比实验。结果表明, 1) Ciomp-6 存在的阿贝误差对光栅波前质量有较大的影响, 尤其是中阶梯光栅和高刻线密度光栅, 必须予以校正; 2) 采用本文提出的阿贝误差测量和校正方法, 刻划了 79 groove/mm 中阶梯光栅, 光栅衍射级次为 -36 级的衍射波前误差由补偿前的  $0.529\lambda$  降低到  $0.159\lambda$ 。阿贝误差校正后分度系统实现了全闭环控制, 但是刻划系统处于开环状态, 其对光栅指标的影响没有进行测量和校正, 下一步将分析刻划系统对刻线误差的影响, 进一步提高光栅的质量。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Mi Xiaotao, Yu Hongzhu, Yu Haili, *et al.* Analyze and improve of rod structure for large diffraction grating ruling engine[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 745-752.  
糜小涛, 于宏柱, 于海利, 等. 大型衍射光栅刻划机拉杆结构的分析与改进[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 745-752.
- [3] Song Nan, Feng Shulong, Yu Haili, *et al.* Design and analysis of diamond carrier aerostatic guideway in large diffraction grating ruling engine[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408007.  
宋楠, 冯树龙, 于海利, 等. 大光栅刻划机气浮刀架导轨设计与分析[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408007.
- [4] Yang Zengpeng, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.* Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911003.  
杨增鹏, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 棱镜光栅组合色散型超光谱成像系统的优化设计[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0911003.
- [5] Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayanheshig, *et al.* Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 52-57.  
刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 52-57.
- [6] Lu Yuxian, Qi Xiangdong, Mi Xiaotao, *et al.* Detection and calculation of mosaic grating error based on wavefront method[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0505001.  
卢禹先, 齐向东, 糜小涛, 等. 基于波前法的光栅拼接误差检测及计算方法[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0505001.
- [7] Lu Yuxian, Qi Xiangdong, Yu Haili, *et al.* Precision analysis of grating replicated mosaic error based on the principle of Fraunhofer[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0508005.  
卢禹先, 齐向东, 于海利, 等. 基于夫琅禾费原理的光栅复制拼接误差精度分析[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508005.
- [8] Yu Lei, Lin Guanyu, Yu Xiangyang. Optical system of far ultraviolet imaging spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122001.  
于磊, 林冠宇, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学设计[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122001.
- [9] Yang Chao, Yu Haili, Feng Shulong, *et al.* Influence of running accuracy of ruling carriage system on grating spectrum performance[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2674-2682.  
杨超, 于海利, 冯树龙, 等. 光栅刻划刀架系统的运行精度对光栅光谱性能的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2674-2682.
- [10] 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.
- [11] 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. 利用泽尼克系数求衍射光栅的分辨本领[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 264-267.
- [12] Yang Chao, Yu Haili, Zhang Shanwen, *et al*. Active control technology to correct the quality of the grating wavefront[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0108002.  
杨超, 于海利, 张善文, 等. 光栅刻划机衍射波前质量的主动控制校正方法[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108002.
- [13] Harrison G R, Sturgis N, Davis S P, *et al*. Interferometrically controlled ruling of ten-inch diffraction gratings[J]. Journal of the Optical Society America, 1959, 49(3): 205-211.
- [14] Mi Xiaotao, Yu Hongzhu, Gao Jianxiang, *et al*. Design of controller of the micro-positioning system for large diffracton grating ruling engine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 473-480.  
糜小涛, 于宏柱, 高键翔, 等. 大型衍射光栅刻划机微定位系统控制器设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 473-480.
- [15] Harrison G R, Thompson S W. Large diffraction gratings ruled on a commercial measuring machine controlled interferometrically[J]. Journal of the Optical Socoity America, 1970, 60(5): 591-595.
- [16] Harrison G R, Thompson S W, Kazukonis H, *et al*. 750-mm ruling engine producing large gratings and echelles[J]. Journal of the Optical Society America, 1972, 62(6): 751-756.
- [17] 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.
- [18] Kita T, Harada T. Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings[J]. Applied Optics, 1992, 31(10): 1399-1406.