

光栅刻划机衍射波前质量的主动控制校正方法

杨 超^{1,2} 于海利¹ 张善文¹ 于宏柱¹ 李晓天¹ 唐玉国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 衍射波前质量是刻划光栅的重要性能指标之一,对于机械刻划光栅,刻划机的刻线定位精度直接影响光栅的波前质量。建立了刻划机固有存在的刻线位置和转角误差与光栅衍射波前误差间的数学关系,分析了各误差对衍射波前质量的影响。针对该误差设计了一种基于双频激光干涉测量的刻划机刻线位置和转角误差测量的光路,并提出了一种主动控制技术,即采用单压触动物器校正刻线位置和转角误差的方法。根据该校正方法设计了刻划机的双层光栅承载工作台结构,并进行了尺寸为80 mm×60 mm、刻线密度为194 line/mm的光栅刻划实验。实验结果表明,刻划光栅的衍射波前误差由0.23λ降低至0.093λ(λ=632.8 nm),并且原子力显微镜测试光栅刻槽质量符合理论设计要求。

关键词 光栅; 刻划光栅; 光栅波前; 刻线位置误差; 转角误差; 压电驱动器

中图分类号 TH113.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0108002

Active Control Technology to Correct the Quality of the Grating Wave-Front

Yang Chao^{1,2} Yu Haili¹ Zhang Shanwen¹ Yu Hongzhu¹ Li Xiaotian¹ Tang Yuguo¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract Diffracted wave-front quality is one of the most important performance indexes for ruled gratings. For mechanically ruled gratings, positioning accuracy of the groove directly affects the wave-front quality of the gratings. The mathematical relationship between the inherent errors of the ruling machine which including the error of groove position, error of yaw and wave-front error of the gratings is developed, and the impact of various errors on the wave-front quality is analyzed. According to the error of groove position and error of yaw, a measure optical path is designed based on double-frequency laser interference, and a method to correct the error of groove position and error of yaw is proposed using piezoelectric actuator. According to the correction method, a double workbench is designed, and the ruling experiments for the size of 80 mm×60 mm and groove density of 194 line/mm are carried out. The results show that the diffracted wave-front error of the ruled grating is reduced from 0.23λ to 0.093λ (λ=632.8 nm), and testing quality of the groove by atomic force microscope meets the requirement of the theoretical design.

Key words gratings; ruled grating; wave-front of the grating; error of groove position; error of yaw; piezoelectric actuator

OCIS codes 050.1950; 050.2770; 120.5050; 220.4830; 230.0040

收稿日期: 2014-06-13; 收到修改稿日期: 2014-08-15

基金项目: 国家973计划(2014CB049500)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2008-1)、吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)

作者简介: 杨超(1986—),女,博士研究生,主要从事衍射光栅干涉测量技术方面的研究。E-mail: yangchaoby@sina.com

导师简介: 唐玉国(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱仪器及医用光谱技术方面的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

光栅是一种分光元件,广泛应用于各类光谱仪器中^[1-2],光栅的光谱性能直接影响光谱仪的光谱解析能力,而光栅的波前质量直接决定了光栅的光谱线质量和分辨本领。

作为制作刻划光栅的衍射光栅刻划机由刻划系统和分度系统组成^[3-4]。刻划系统主要由鞍型滑块(带动刀架系统做往复运动)、石英导轨(起到承重和导向作用)以及刻划刀架结构组成^[5]。刻划过程中推拉杆带动鞍型滑块在石英导轨上做往复运动,从而使刻划刀架带动金刚石刻刀实现光栅的刻划。分度系统主要由分度电机、工作台结构以及光路测量系统组成。分度电机驱动工作台做单向运动,带动光栅基底完成一个光栅栅距。光栅刻划机受分度系统机械加工误差和装调误差的影响,使刻划的光栅存在刻线误差^[6-9]。对于机械刻划光栅而言,刻划机的刻线误差直接影响光栅的波前质量^[10-11]。早期光栅刻划机均为开环控制式纯机械刻划,由于装调误差、机械加工误差以及运行摩擦振动等因素影响,无法刻划出高精度的衍射光栅。随着干涉测量技术^[12]以及压电驱动器^[13]在光栅刻划机中的逐步应用,光栅刻划机精度得到巨大提高。美国麻省理工学院研制的 MIT-C 机^[14-15],利用单频激光干涉仪作为测量反馈元件,差速轮系作为执行元件构成闭环系统,当工作台存在位移以及转角误差时,电机驱动内层台实现导轨直线度误差的校正,提高了刻线定位精度,最终实现了 350 mm×450 mm 大面积中阶梯光栅的刻划,其波前质量约为 $\lambda/4$; 日本 Hitachi 刻划机^[16],双频激光干涉仪作为测量反馈元件,压电陶瓷(PZT)作为执行器件构成光电闭环控制系统,干涉仪测量得到在 300 mm 的行程内工作台摆角误差为 0.2"。为了提高我国现有光栅刻划机的衍射波前质量,本文根据中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 CIOMP-2 机械结构特点,设计了校正工作台刻线误差的测量光路,并提出一种单压电驱动器主动控制技术,即采用单压电驱动器根据测量结果实时驱动工作台实现对位移以及转角误差的补偿方法,同时根据主动控制技术设计了刻划机双层工作台结构。采用上述刻划机,刻划尺寸为 80 mm×60 mm 的衍射光栅,并对该光栅的波前质量进行了测量,验证了该刻划机的刻线误差校正结果。

2 建立刻线误差对光栅波前质量影响的物理模型

2.1 刻线误差来源

光栅刻划机主要由分度系统和刻划系统组成,工作流程如图 1 所示,其中分度系统包括工作台的宏定位(实线框所示)和微定位(虚线框所示)系统。

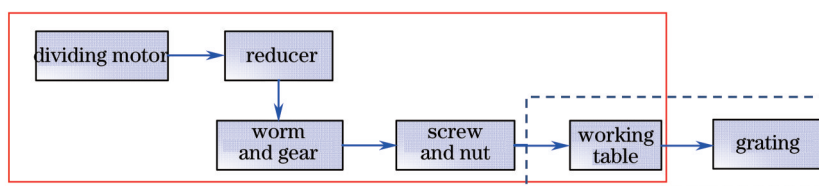


图 1 光栅刻划机分度系统框图

Fig.1 Diagram of the grating ruling engine in indexing system

分度电机经过减速器减速后,带动蜗轮蜗杆副和丝杠螺母副运动,螺母与工作台通过弹簧片相连,从而使分度电机带动工作台进行宏定位操作。宏定位时,分度电机输出一个理想栅距,通过丝杠驱动工作台完成一个目标栅距,如图 2 所示,当光栅刻划机由 A 运动到 B 时,由于刻划机工作台受丝杠螺母副、蜗轮蜗杆副以及导轨加工精度的影响,使丝杠运动一个光栅栅距时带动工作台外层台产生刻线位置误差 δ'_p 和转角误差 $\alpha'(p)$,外层台带动内层台转动,使固定于内层台的毛坯产生刻线位置误差 δ_p 和转角误差 $\alpha(p)$,金刚石刻刀位置不变,使光栅第 p 条刻线产生了刻线位置误差和转角误差。

2.2 刻线误差对光栅波前质量的影响

刻划任意刻槽 p ,光栅实际刻线 p' 沿理想刻线 p 产生 δ_p 的位置误差,因此,对于将要刻划的光栅毛坯而言,每刻划一个刻槽前,都会由光栅刻划机误差产生相应的刻线位置误差矩阵,对于整块光栅毛坯建立的刻线位置误差矩阵 δ_{ab} 为

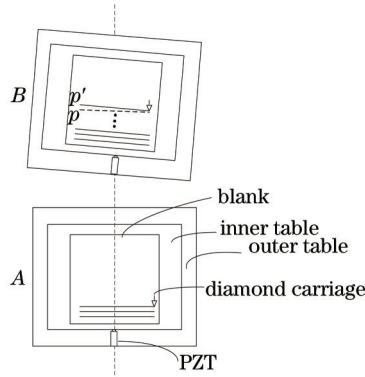


图2 光栅刻划机分度系统误差产生刻线位置和转角误差示意图

Fig.2 Schematic of position errors and yaw errors produced by indexing system of grating ruling engine

$$\delta_{ab} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{21} & \cdots & \delta_{a1} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{a2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{1b} & \delta_{2b} & \cdots & \delta_{ab} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

则入射光线和衍射光线在该点产生的光程差为

$$\delta = \delta_{ab} \times (\sin \theta_{1b} + \sin \theta_{2b}), \quad (2)$$

光栅方程为

$$d(\sin \theta_{1m} + \sin \theta_{2m}) = m\lambda, \quad (3)$$

式中 d 为光栅常数, θ_{1b} 为入射角, θ_{2b} 为 m 级的衍射角, m 为衍射级次, λ 为入射光波长, 将(3)式代入(2)式中, 因此刻线位置误差(光栅刻划栅距的变化)引起的光栅波前差为

$$\Delta_1 = \delta_{ab} \frac{m}{d}. \quad (4)$$

当光栅刻划机的刻划宽度为 L , 刻划任意刻槽 p 时, 光栅刻划机在刻划过程中由于分度系统误差导致刻线转角误差为 $\alpha(p)$, 转角误差矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} \tan[\alpha(1)] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \tan[\alpha(2)] & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tan[\alpha(b)] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由转角误差引起的刻线位置误差为

$$\delta_\alpha = L \begin{bmatrix} \tan[\alpha(1)] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \tan[\alpha(2)] & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tan[\alpha(b)] \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(4)式可知, 由刻线转角误差引起的光栅波前差为

$$\Delta_2 = \delta_\alpha \frac{m}{d} = L \times \frac{m}{d} \begin{bmatrix} \tan[\alpha(1)] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \tan[\alpha(2)] & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tan[\alpha(b)] \end{bmatrix}. \quad (7)$$

此时根据(4)式和(7)式, 建立如下刻线位置误差、刻线转角误差对光栅波前的质量影响的物理模型:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{m}{d} \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{21} & \cdots & \delta_{a1} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{a2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{1b} & \delta_{2b} & \cdots & \delta_{ab} \end{bmatrix} + L \times \frac{m}{d} \begin{bmatrix} \tan[\alpha(1)] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \tan[\alpha(2)] & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \tan[\alpha(b)] \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对于 300 line/mm 的常规光栅、79 line/mm 的中阶梯光栅以及 6000 line/mm 的高刻线密度光栅, 将相同的刻线位置误差以及转角误差代入(8)式物理模型中, 可以得出如图 3 所示波前差示意图, 其中横坐标代表加入

的刻线位置误差,纵坐标代表加入的刻线转角误差,右侧彩色条代表光栅的波前值。由此可知,当刻划光栅存在位置和转角误差时,随着光栅刻线密度增大以及光栅使用级次增高,刻线误差对光栅波前质量产生很大影响。因此为了提高光栅波前质量,必须进行刻线误差的校正。

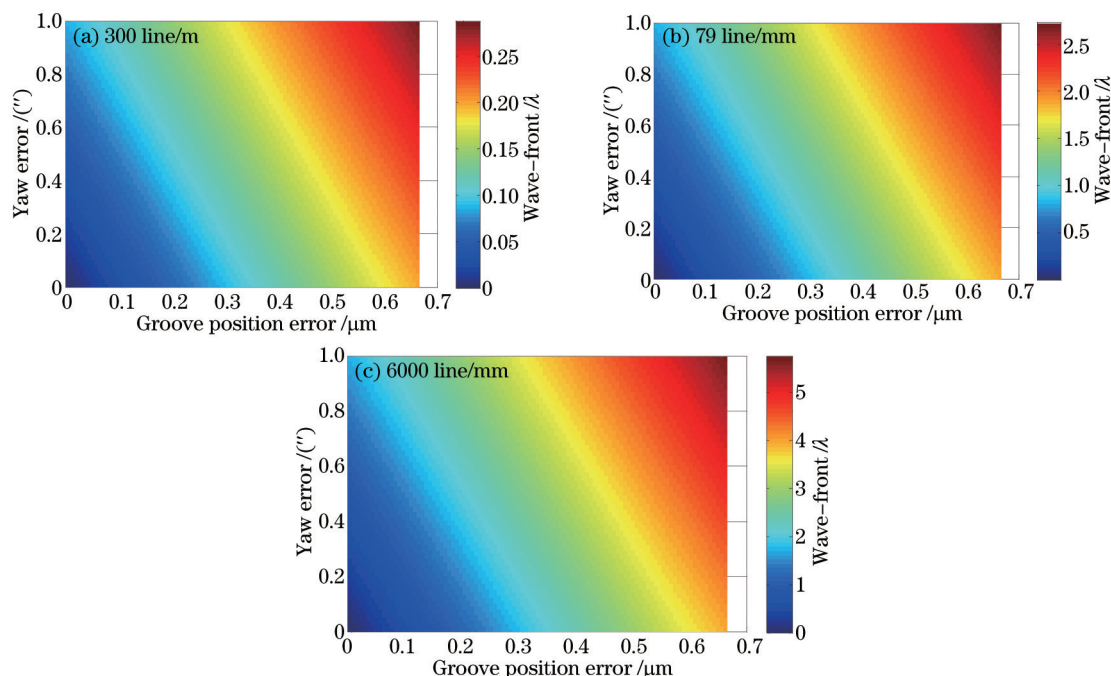


图3 刻线位置误差和转角误差对不同刻线密度光栅波前质量的影响

Fig.3 Impact of groove position error and yaw error on the grating wave-front quality for different groove densities

3 单压电陶瓷主动控制提高光栅刻线定位精度的方法

由第2节理论分析可知,刻线误差对于光栅波前值有很大影响,而光栅刻划机定位精度是导致刻线误差的重要来源,因此本文设计了测量刻线位置误差和转角误差的测量光路,同时通过主动控制方法提高光栅刻划机的定位精度,使刻划光栅具有良好波前质量。下面进行具体介绍。

3.1 测量光路

基于分度系统特点,设计了一套实时测量工作台位置误差和转角误差的测量光路,如图4所示。双频激光器发出的光被分光镜2分为两束,一束光直接入射到干涉仪5,另一束光被分光镜3分为两束,一束入射到波长跟踪器6,另外一束通过折转镜入射到干涉仪7。波长跟踪器7测量光栅刻划一个周期,从干涉仪到测量镜之间的空气折射率变化,进而补偿环境因素引起的位移测量误差值。从干涉仪5、7输出的光入射到测量反射镜8上,参考镜位置不变,当测量反射镜位移发生变化时,将产生多普勒效应,测量光束叠加频移量为 Δf 。最后耦合光束通过孔径射出被接收器接收,信号发送到测量板卡,光栅刻划机运动过程中工作台内层台两侧的位移变化量为

$$l = \frac{\lambda}{4} \int_0^t \Delta f \times dt = N \frac{\lambda}{4}, \quad (9)$$

式中 Δf 为频移量, N 为脉冲计数个。

当两测量镜之间的距离为 L_0 , l_{p1} 和 l_{p2} 分别刻划第 p 条刻线时左路和中路干涉仪测量两端的位移量大小,则光栅刻划时的刻线位置误差为 l_{p2} ,理想刻线 p' 和实际刻线 p 之间的夹角 $\alpha(p)$ 为

$$\tan[\alpha(p)] = \frac{l_{p1} - l_{p2}}{L_0}. \quad (10)$$

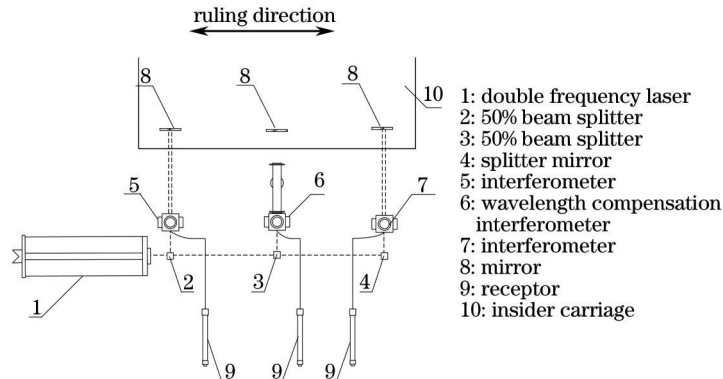


图4 光栅刻线位置误差和转角误差测量光路

Fig.4 Optical arrangement for experiment to measure position errors and yaw errors

3.2 单压电陶瓷主动控制技术的原理

光栅刻划机采用比例-积分-微分(PID)控制算法通过微定位系统修正宏定位结束后工作台与目标栅距存在位置与角度误差。实际测量得到在隔振条件良好的情况下,以双频激光干涉仪为纳米位移测量基准,进行光栅空运动刻划时,PID算法可实现宏微两级工作台定位误差 3δ 值不大于 5 nm,满足微定位控制系统要求。

微定位系统流程如图5所示,微定位系统包括外层台、内层台、压电驱动器、双频激光干涉仪以及光栅毛坯,宏定位结束后工作台与目标栅距存在的位置与角度误差通过外层台直接传递到放置于内层台上的光栅毛坯,采用图4所示的测量光路实时测量得到内层台位移与转角误差值,通过压电陶瓷伸缩实现对内层台的误差校正,使光栅毛坯理想位置 and 实际位置之间位置误差趋于零。

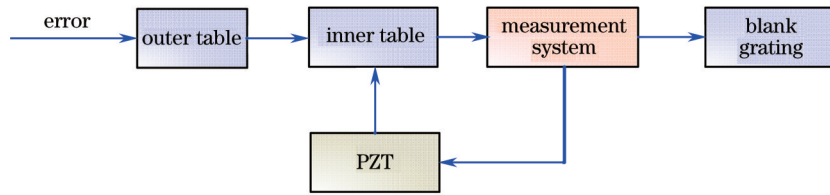


图5 微定位系统流程图

Fig.5 Flow diagram of the micro-positioning system

主动控制校正工作台方法如图6所示,光栅刻线长度为 L , x 表示刻划到刻线的任意位置, m 为第 p 条刻线刻划到 x 位置时的测量点总数。单压电陶瓷驱动内层台中心,通过测量光路实时测量出内层台在同一时刻不同位置 $x(m)$ 的两侧位移量,计算出理想刻线 p' 和实际刻线 p 的位移 δ_p 和角度 $\alpha(p)$,为了实现光栅刻线的位移及角度校正,从刀尖落到光栅毛坯表面刻划开始,刻线误差校正与光栅刻划同时进行,根据实时测量得到的位移和转角误差,采用单压电陶瓷驱动内层工作台实时补偿 L_{sp} 的位移量为

$$L_{sp} = \delta_p + x \tan[\alpha(p)], \quad x = [0, L], \quad (11)$$

将(10)式代入(11)式得出单压电陶瓷主动校正工作台的位移量为

$$L_{sp} = \delta_p + \frac{(l_{p1} - l_{p2})x}{L_0}, \quad x = [0, L], \quad (12)$$

式中 $\delta_p = (l_{p1}, l_{p2})_{\min}$ 。

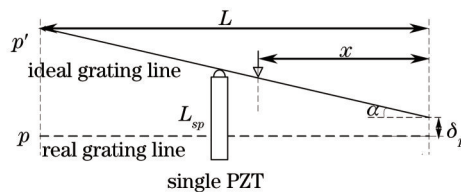


图6 主动控制方法校正工作台示意图

Fig.6 Schematic diagram of correcting the working table by a method of active control

由于主动控制技术是金刚石刻刀在光栅毛坯刻划时进行实时补偿,产生高频振动,将会对光栅刻槽质量产生一定影响,因此刻划结束需要对光栅的刻槽质量进行鉴定。

4 双层光栅承载工作台组成结构

双层光栅承载工作台三维模型图如图7所示。工作台采用双层台结构,外层台在滑动导轨上,为了消除内外层台的摩擦力,将内层台通过4个弹簧片悬挂于外层台上,4个弹性钢片对称平行放置,使得内层台重心平衡。单压电陶瓷与外层台固定连接,通过一个刚度较高的滚珠驱动固定于内层台的蓝宝石运动,并利用拉簧提供初始封闭力。光栅刻划时,外层做单向运动,压电陶瓷驱动内层台实时进行微定位调节。

该结构的内层工作台悬挂于外层工作台,由于弹簧片在X方向(分度方向)和Y方向(刻划方向)的刚度差非常大,因此,内层台被约束在Y方向,减少外层台位移和转角误差传递到内层台;同时内层台在X方向可以进行微小的位移调整,利于单压电陶瓷驱动工作台实现刻线误差的校正。

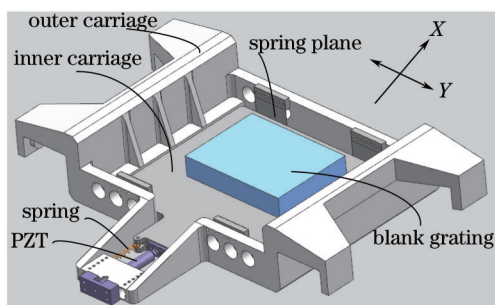


图7 双层光栅承载工作台三维示意图

Fig.7 Three-dimensional schematic diagram of grating double-layer bearing work

5 光栅刻划实验

为了验证上述结构和控制方法对光栅质量的影响,刻划了一块尺寸为80 mm×60 mm的常规光栅,光栅设计参数如表1所示,分别测量了其光栅波前、光栅槽型和衍射效率指标,并通过波前值计算了该光栅的转角误差。

表1 光栅设计参数

Table 1 Design parameter of the grating

Ruling size /mm	Groove	Start	End	Center	Blaze angle /($^{\circ}$)
	spacing / (line/mm)	wavelength / μm	wavelength / μm	wavelength / μm	
80×60	194	1.4	1.8	1.6	9.8

图8为光栅刻划过程中不加入主动控制方法和加入主动方法分别刻划满足表1光栅设计参数的光栅时,采用ZYGO干涉仪测量得到-1级光栅波前值。由图8可以看出,在来校正之前,其衍射波前差为 0.23λ ,采用本文方法刻划光栅测量得到光栅波前值为 0.093λ ,波前质量提高了59.5%。

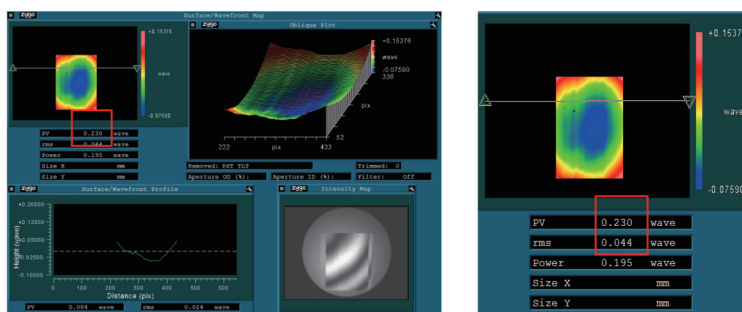
此外,通过光栅波前测量数据提取光栅刻划误差^[11],计算得到刻线位置误差峰谷(PV)值约为92.35 nm,转角误差PV值约为 $0.23''$ (工作台不做摆角校正时通过平行光管测量摆角误差约为 $1.5''$)。

用原子力显微镜(AFM)对光栅槽形进行测试,光栅的剖面图和三维照片如图9所示,图9(a)下方黑框区域为光栅闪耀角和非闪耀角平均测试结果,分别为 9.83° 和 58.27° ,接近理论设计值,得到了较好的光栅槽型。

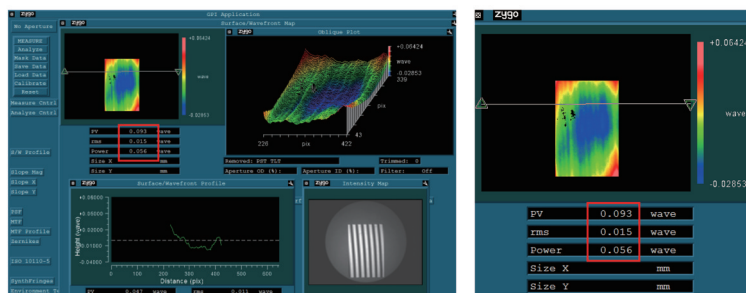
通过光栅电磁场计算,该光栅理论衍射效率为88%。采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 的激光器直接照射光栅表面测量其绝对衍射效率,采用逐点测量方式,多次测量取平均得到该光栅衍射效率为86%,测量值与理论值一致。

6 结 论

根据CIOMP-2的结构特点,设计了测量光栅刻划机刻线误差的测量光路,并提出了一种单压电陶瓷校正工作台刻线误差的方法。根据该校正方法设计了光栅刻划机双层工作台结构。通过光栅刻划实验,得出



(a) without active control



(b) under active control

图8 Zygo干涉仪测量光栅波前质量

Fig.8 Wave-front quality of the grating measured by Zygo interferometer

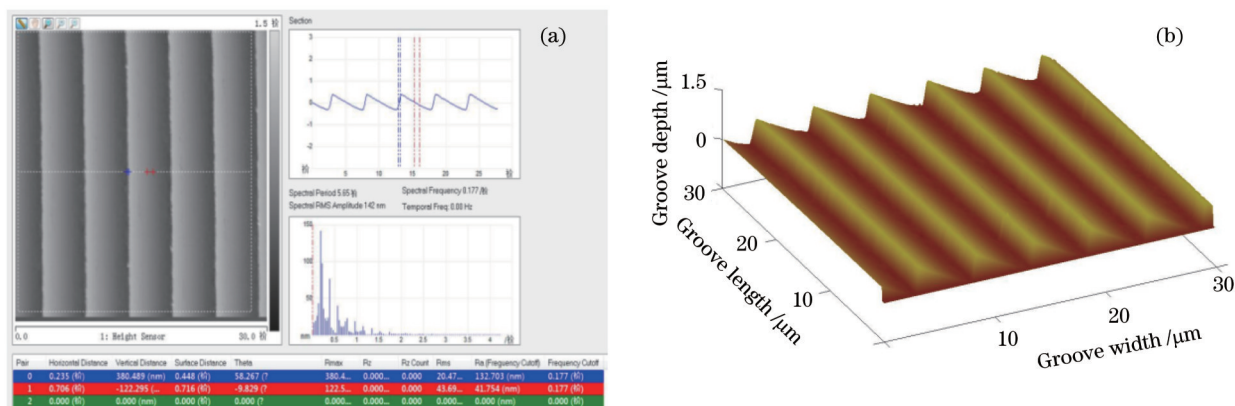


图9 原子力显微镜测量光栅槽型质量。(a) 光栅剖面图; (b) 光栅三维照片

Fig.9 Testing results by AFM for grating groove quality. (a) Profile map of grating; (b) three-dimension photograph of grating

如下结论: 1) 刻线位置误差和刻线转角误差严重影响光栅波前质量, 尤其对中阶梯光栅和高刻线密度光栅, 光栅刻线误差必须进行校正; 2) 不采用单压电陶瓷主动控制技术刻划常规光栅, 其衍射波前差为 0.23λ , 采用该方法刻划光栅测量得到光栅波前值为 0.093λ , 衍射效率达到 86%; 3) 刻划光栅通过原子力显微镜观察, 主动控制方法并没有对光栅槽型产生影响, 刻划结果显示光栅闪耀角和非闪耀角接近理论值, 该光栅具有较好的槽型。但目前主动控制理论仅应用于校正分度系统误差方面, 刻划系统误差对光栅性能指标仍具有较大影响, 今后应将该方法延伸到刻划系统误差的校正中, 进一步提高光栅刻划机的刻划精度。

参考文献

1 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.
 2 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.

- 3 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. 21-26.
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. 21-26.
- 4 Shi Lun, Hao Defu, Qi Xiangdong. State-of-the-art of the high-precision diffraction grating ruling engine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4): 438-439.
时 轮, 郝德阜, 齐向东. 高精度衍射光栅刻划机的最新技术进展[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 438-439.
- 5 Chen Kewei, Yu Hongzhu, Zhang Shanwen, *et al.*. Design of diamond carriage system for large diffraction grating ruling engine[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2900-2905.
陈科位, 于宏柱, 张善文, 等. 大型衍射光栅刻划机刀架系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(11): 2900-2905.
- 6 John Strong. New Johns Hopkins ruling engine[C]. New York Meeting of the Optical Society of America, 1951, 41: 3-14.
- 7 Harrison G R. Techniques for ruling improved large diffraction gratings final report[C]. Massachusetts Institute of Technology, 1971. 1-14.
- 8 Harrison G R, Sturgis N, Davis S P, *et al.*. Interferometrically controlled ruling of ten-inch diffraction gratings[J]. J Opt Soc Am, 1959, 49(3): 205-208.
- 9 Harrison G R, Sturgis N, Baker S C, *et al.*. Ruling of large diffraction gratings with interferometric control[J]. J Opt Soc Am, 1957, 47 (1): 15-21.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Cai Jinda, Wang Ying, Yan Tingmeng, *et al.*. Closed-loop control system for diffraction grating ruling machine[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2416-2423.
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): 2416-2423.
- 13 Liu Po, Guo Jianying, Sun Yongquan. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1503-1509.
刘 泊, 郭建英, 孙永权. 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.
- 14 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.
- 15 George R Harrison, Stephen W Thompson, Harry Kazukonis, *et al.*. 750-mm ruling engine producing large gratings and echelles[J]. J Opt Soc Am, 1972, 62(6): 751-756.
- 16 Toshiaki Kita, Tatsuo Harada. Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings[J]. Appl Opt, 1992, 31(10): 1399-1406.

栏目编辑: 史 敏