

大光栅刻划机气浮刀架导轨设计与分析

宋楠^{1,2} 冯树龙¹ 于海利¹ 齐向东¹ 巴音贺希格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 尝试在大型衍射光栅刻划机中使用气浮导轨承载金刚石刻划刀具系统运行。气浮导轨同时承担刀具系统的承重与导向任务, 由于使用气体作为润滑剂而接近零摩擦状态, 可以避免触点磨损及低速爬行现象。分析了气浮导轨工作过程中产生的误差及该误差对刻划刀具运动轨迹的影响, 并使用双频激光干涉仪测量刻划过程中刻划刀具运动的直线度误差。测量结果表明, 金刚石刀具系统单向行程 400 mm 时, 该误差约为 200 nm, 小于使用石英导轨承载刀具系统时的误差, 同时在高频振动方面有明显改善。刻制一段 79 gr/mm, 400 mm×500 mm 的中阶梯光栅, 观察其衍射光斑并使用照度计检测得其不同位置杂散光强度为 0.2‰~5‰, 实验结果表明使用气浮导轨承载刻划刀具可以满足光栅刻划精度要求。

关键词 光栅; 衍射光栅; 光栅刻划机; 气浮导轨; 双频激光干涉仪; 刀架系统

中图分类号 TH113.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0408007

Design and Analysis of Diamond Carrier Aerostatic Guideway in Large Diffraction Grating Ruling Engine

Song Nan^{1,2} Feng Shulong¹ Yu Haili¹ Qi Xiangdong¹ Bayanheshig¹ 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 We have attempt to use aerostatic guideway to load the diamond carriage system in large diffraction grating ruling engine. Aerostatic guideway undertakes the task of bearing and guiding the diamond carriage system simultaneously. Applying air as lubricant, the friction of aerostatic guideway is approach to zero and can avoid the wear and creeping phenomenon. The motion error of the aerostatic guideway as well as the error's influence on the diamond carriage system are analyzed. The linear movement accuracy of diamond carriage system during the ruling process is measured with a dual-frequency laser interferometer. The results show that the linear accuracy is about 200 nm on 400 mm one-way trip, less than using quartz guide. Besides, there is a significant improvement in high frequency vibration. An echelle grating with 79 gr/mm and 400 mm×500 mm area has been ruled by this system. The grating's diffraction spot is displayed and its stray light intensity varies from 0.2‰ to 5‰ in different positions, examining with an illuminometer. The results show that the aerostatic guideway can satisfy the requirements of grating ruling.

Key words gratings; diffraction grating; grating ruling engine; aerostatic guideway; dual-frequency laser interferometer; diamond carrier system

OCIS codes 050.1950; 120.3180; 120.7280; 350.4600

收稿日期: 2014-10-29; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZBYZ2008-1)

作者简介: 宋楠(1985—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光谱仪器及光栅刻划等方面的研究。

E-mail: kane_martin@163.com

导师简介: 唐玉国(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱仪器及医用光谱技术等方面的研究。

E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

1 引言

衍射光栅是一种具有周期性浮雕结构的特种分光元件,广泛应用于各类光谱仪器之中^[1-3]。衍射光栅的制作方法主要分为机械刻划与全息曝光两种。机械刻划是由安装有金刚石刻刀的刀架相对于光栅基底进行等速往复运动,在光栅基底表面挤压出一系列等间距的直线刻槽^[4],此种刻划方式对机械结构的稳定性和运动精度要求较高。对于低刻线密度的红外激光光栅和绝大多数中阶梯光栅而言,由于对刻槽深度和槽形要求比较严格,因此一般采用机械刻划方式。刻线长度在 300 mm 以上的大面积光栅具有卓越的聚光能力和分辨本领,常用于弹道导弹的远距离探测、惯性激光核聚变及深空探测等领域。目前世界上能够刻划出刻槽长 300 mm 以上成品大面积光栅的刻划机仅有 MIT-B、MIT-C 及日立机三台。

光栅刻划机的刻划系统主要有以下几种结构形式。美国 Jarrell-Ash 刻划机以及我国长春光机所的 1 号、3 号、4 号和 5 号刻划机均采用“跨桥式”结构,即刀架系统跨过光栅基底的两端,刻刀系统固定于刀架中部,刻划时刀架整体进行往复运动。该结构运行稳定,侧向刚度好,缺点是刻划机占用面积过大,不利于刻制大光栅。美国 MIT-B 机及 MIT-C 机均采用承重导轨及导向导轨分离式结构^[5],该结构使用氮化钢圆柱形导轨为金刚石刻刀系统承重,使用高精度熔融石英平面导轨导向。该结构简单紧凑,但对机械加工精度和装配精度要求很高,如 MIT-C 机承重导轨的直线度为一个条纹。日本日立机^[6]和长春光机所 2 号刻划机均使用石英玻璃导轨同时实现金刚石刀架的承重和导向功能。

长春光机所计划研制一台达到国际领先水平的大型高精度衍射光栅刻划机,并利用该装备研制出刻划面积为 400 mm(槽长)×500 mm(刻宽)的衍射光栅。由于刻划行程过长,为解决刀刃磨损问题使用了可以刻划过程中切换刀刃的复合式刀架。在载荷增加的情况下,若使用 MIT-C 机的结构则机械加工能力难以保证圆柱形导轨的精度。此外在使用石英导轨承重导向合一结构的实验过程中发现由于石英玻璃的刚度较低,刀架驱动力与导向面不完全平行引入的侧向力会使刀架产生偏摆,影响刻划精度。对于大面积光栅,由于刻划行程过长造成润滑效果不够理想,刻划过程中会产生一定的低速爬行现象,并且容易造成触点的磨损,导致光栅刻槽无法满足精度要求。

气浮导轨是一种适用于精密机械的导向装置。由于以粘度极低的气体作为润滑剂,滑块与导轨间无接触,气浮导轨接近零摩擦状态^[7],可以消除微动爬行现象,同时具备良好的运动精度、低速性能、误差均化作用、低振动、工作寿命长以及润滑介质无需回收且无污染等优点。本文尝试在大型光栅刻划机中使用气浮导轨承载金刚石刻划刀具运行,以避免光栅刻划过程中产生的磨损及爬行现象,同时对气浮导轨的运动精度进行分析及实验验证,证明其可以满足光栅刻划精度要求。

2 机械结构设计

光栅刻划需要系统长时间的稳定工作,因此气浮刀架导轨所使用的材料应满足稳定性、耐腐蚀性和良好的机加工性。综合考虑各方面因素,静导轨结构简单,采用具有线胀系数小、热稳定性好、减震能力强等优点的花岗岩;动导轨采用密度低、动态性能好的铝合金,以便于加工内部气路及节流器结构。

静压气浮导轨的常见形式有完全封闭型、半封闭型、圆柱封闭型、开式重量平衡型、开式负压平衡型等。对大光栅刻划机而言,气浮刀架导轨需要横跨光栅工作台,静导轨总长度超过 900 mm,为了减小挠度变形的影响,不能选择圆柱封闭型导轨;对动导轨运动精度及刚度要求较高,而载荷较低,除支撑动导轨自重外,负载仅为刻划刀架及配重,不超过 10 kg,因此选择完全封闭式气浮导轨结构形式。气浮刀架导轨由基座、静导轨、动导轨、球头及 V 形压板安装座组成,如图 1 所示。

对光栅刻划而言,需要系统的稳定性尽可能高,结构尽量简单,减少可调节因素。光栅刻划需要金刚石刻刀刀尖垂直于光栅基底表面膜层,在静导轨的安装过程中需要使其上表面平行于工作台。为了便于调整该平行度同时保证系统的稳定性,将静导轨两端加装球头并架在 V 型底座上,使用倒 V 型压板固定。V 型底座下方放置一金属修研垫,通过对其修研保证静导轨两端等高,以避免光栅刻划中造成刻槽深度不均匀。

对于动导轨的驱动,应尽量使驱动力作用在动导轨的几何中心位置上以避免引入侧向力,影响气浮刀架导轨的运动精度。由于光栅刻划对温度的影响比较敏感,必须将驱动电机安放在远离刻划系统与光栅工

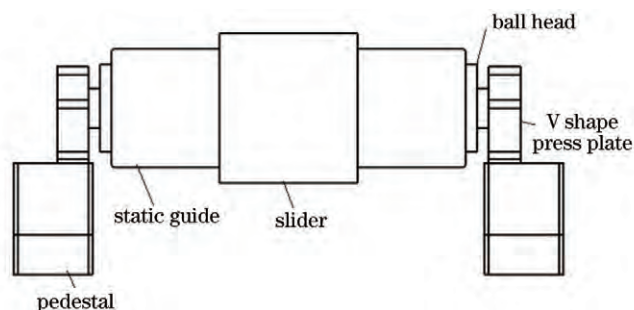


图1 气浮刀架导轨结构图

Fig.1 Structure of diamond carrier aerostatic guideway

作台的位置,并使用防护罩隔开,因此不能将发热量大的直线电机直接安装在气浮导轨上进行驱动,驱动力只能作用在动导轨的外壁上,会带来一定的侧向力影响。此外,为避免金刚石刻划刀刀尖随动导轨产生分度方向的偏转,气浮刀架导轨在工作行程中产生的倾覆角应尽量小,而气浮导轨的刚度和倾覆刚度较小。

为解决以上问题,将两套如图1所示的气浮导轨并联,在两动导轨间以一刚性框体连接,如图2所示。电机驱动力通过推杆或钢缆沿刻划方向作用于该框体几何中心点,理论上避免侧向力的引入。两独立气浮导轨分别通过球头安装座进行调整以保证静导轨上表面与工作台之间平行及两静导轨间平行。通过修研V型底座下方的金属垫以保证两静止导轨等高。金刚石刻划刀具系统安装于动导轨外侧面中线处,另一侧加装配重以平衡转距。

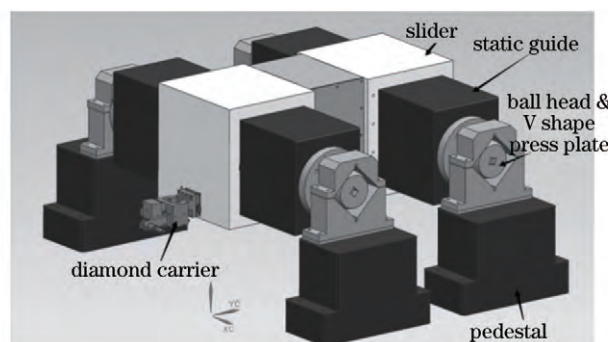


图2 双气浮导轨结构示意图

Fig.2 Structure of double aerostatic guideway

3 误差分析

在光栅刻划过程中,金刚石刻刀在分度方向上的位移造成刻线的弯曲,该误差主要影响光栅弧矢方向的光谱性能,而对光栅杂散光、分辨本领等性能影响较小^[8-9]。

在光栅刻划过程中,气浮导轨部分造成金刚石刻刀在刻划方向的运动直线度误差主要有两个原因。其一是由于动导轨在运动过程中绕静导轨发生偏转使金刚石刻刀在分度方向上产生位移;其二是由动导轨运动的直线度误差引起金刚石刻刀随动导轨运动产生偏移。

对于前者,如图3所示,动导轨相对于静止导轨产生一微小偏转角 θ ,由于动导轨与金刚石刻刀系统之间为刚性连接,并认为动导轨回转中心点为其几何中心点,则刀尖在分度方向产生的位移可近似表示为

$$y_1 = d_1 + d_2 = h \sin \theta + L(1 - \cos \theta), \quad (1)$$

式中 h 与 L 分别为动导轨回转中心点与刀尖之间距离的垂直方向和水平方向分量。

单套气浮导轨在重力方向和水平方向的设计气体刚度为 $150 \text{ N}/\mu\text{m}$,而且两套气浮导轨并联使用,进一步增加了刚度。由于金刚石刻刀刀尖位于滑套中线处,而驱动力作用于两动导轨及连接框组合体的几何中心处,且有配重以平衡刻划刀具系统在重力方向产生的转距,因此动导轨在运动过程中产生的偏转角极小。

对于后者,气浮导轨运行直线精度随静导轨的加工直线精度提高而提高,随动导轨的长度增加而提高,随行程增加而降低。气浮导轨工作时,其直线精度除受运动副本身的几何精度影响之外,还在很大程度上

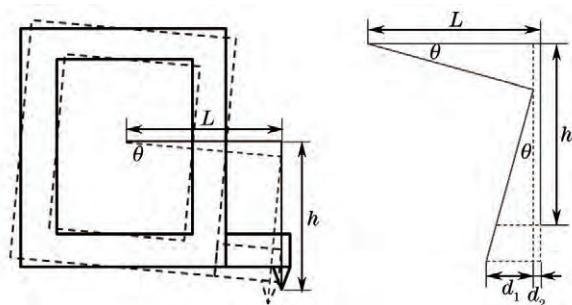


图3 动导轨产生偏转对金刚石刻刀位置的影响

Fig.3 Influence of deformation of slider on the diamond position

得益于运动副对误差的均化作用,在满足最大工作行程及预留限位装置的前提下应尽量增加动导轨长度以提高直线精度。动导轨设计长度 350 mm,最大工作行程 $l_0 = 400$ mm,则导轨有效工作段 $l = 770$ mm,花岗岩静导轨机械加工面型精度 $A = 1 \mu\text{m}$ 。根据齐乃明推导的气浮导轨误差均化公式计算^[10]:

$$\alpha = \frac{l}{l_0} = 1.833 > 0.566. \quad (2)$$

均化后的直线精度为

$$y_2 = \frac{A}{4} \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{1}{1+\alpha}\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{1+2\alpha}{1+\alpha}\right) \right] = 0.263 \mu\text{m}. \quad (3)$$

以上计算中未考虑动导轨自身的直线度、平行度和垂直度,导轨端泄及供气压力波动等因素,因此存在一定误差,实际测量结果比计算数值大。该误差为固定误差,为接近石英玻璃导轨面型精度 $\lambda/8 (632.8 \text{ nm})$ 的标准,可以对静导轨进行进一步的手工修研。

在光栅刻划过程中,受静导轨承重面面型及静导轨在重力方向挠度变形影响,金刚石刻刀工作过程中在重力方向会产生一定的位置误差。该误差仅影响光栅刻槽的深度,对光栅刻划质量影响较小。

4 实验与验证

4.1 气浮导轨直线精度测量与修正

使用自准直仪检测气浮导轨的直线运动精度。将一平面镜放置于动导轨上方,调整自准直仪对准镜面并固定,使动导轨匀速运动,令接收器以每秒一次的频率记录下自准直仪的示数 $\alpha(i)$ (s),该值为动导轨运动轨迹在该点与自准直仪光轴的夹角。按如下公式绘制动导轨运动曲线^[11]:

$$\begin{cases} x(1) = 0 \\ y(1) = 0 \\ x(i+1) = d \cdot i \\ y(i+1) = y(i) + \tan\left[\frac{\alpha(i)}{3600}\right] \cdot d \end{cases}, \quad (4)$$

式中 d 为检测的跨距, x 为动导轨行程, y 为气浮导轨运动直线度误差 (μm)。根据测量结果对静导轨进行手

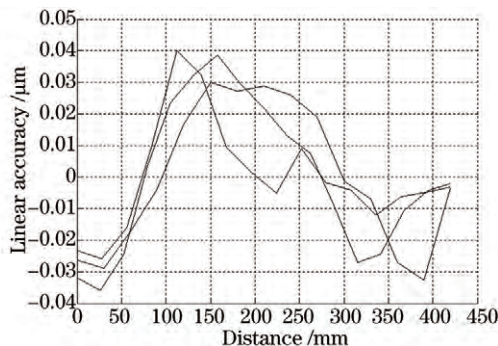


图4 气浮导轨直线运动精度

Fig.4 Linear movement accuracy of aerostatic guideway

工修研,最终重复测量结果如图4所示,气浮导轨运动直线度误差约为70 nm。

4.2 刀架系统运动直线度误差测量

光栅刻划过程的每个周期分为两个过程,一是刻划段,即金刚石刻刀落下在光栅基底表面膜层挤压出一道刻槽;二是回程段,即金刚石刻刀离开膜层表面反向移动回初始位置,同时承载光栅基底的工作台在分度方向移动一个光栅栅距。

使用气浮导轨承载金刚石刀具系统进行光栅刻划,通过双频激光干涉仪测量^[12]光栅刻划过程中金刚石刻划刀在分度方向的运动轨迹,测量装置如图5所示。将激光干涉仪和参考镜安装在金刚石刀具系统上,二者跟随刻刀作往复运动,将一长420 mm,面型精度 $\lambda/10$ 的标准测量镜与激光器固定于刻划机基座上。调整激光器出射光束和标准测量镜与静止导轨平行,参考镜与激光光束垂直,激光干涉仪中的偏振分光镜与激光光束成 45° 角。

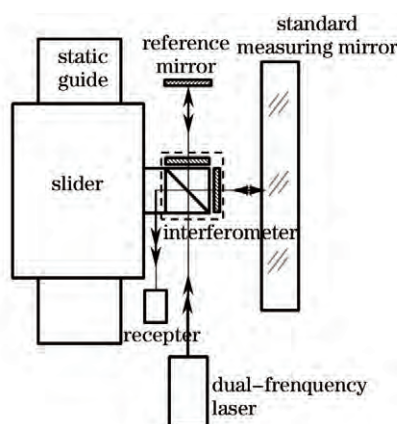


图5 刀架系统运动精度测量装置

Fig.5 Measuring device of the linear movement accuracy of diamond carrier system

在测量过程中,双频激光器发射出两束正交线偏振光,其中一束经参考镜反射后被接收器接收作为参考信号,另一束经过标准测量镜反射后作为测量光束测量刻划刀具系统相对于标准测量镜的距离。在光栅刻划过程中,刻划刀具系统相对于标准测量镜出现分度方向位移,产生多普勒效应,测量光束叠加多普勒频移 Δf 后被接收器接收转换为测量信号。测量信号与参考信号经运算器处理后得到由计数器产生的脉冲计数个数 N ,计算位移量 L ^[13]:

$$L = \frac{\lambda}{4} \int_0^t \Delta f \cdot dt = N \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (5)$$

在光栅刻划时,刻划刀具运动直线度误差除包括气浮导轨的运行直线度误差和动导轨的偏转误差之

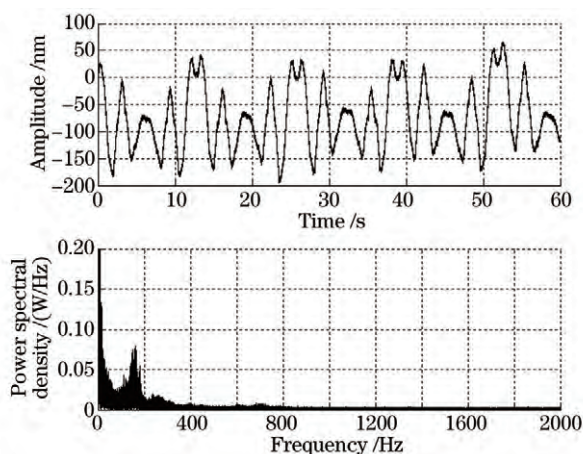


图6 使用气浮刀架导轨时刻划刀具运动直线度误差
Fig.6 Linear movement accuracy of diamond carrier system while riding on the aerostatic guide

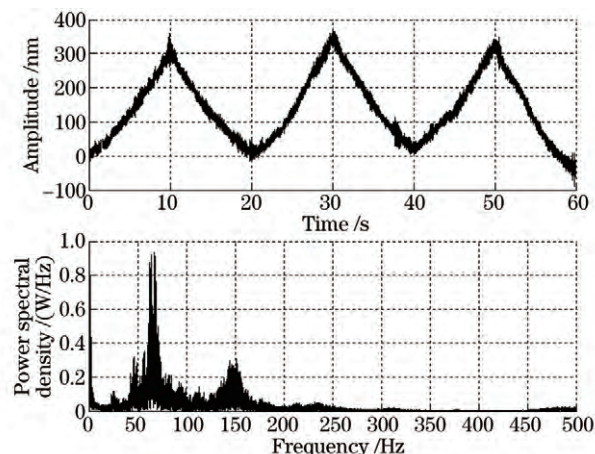


图7 使用石英导轨时刻划刀具运动直线度误差
Fig.7 Linear movement accuracy of diamond carrier system while riding on the quartz guide

外,还受测量镜的面型误差、驱动电机的振动、动导轨加速段和减速段的加速度引起刻划刀具系统振动以及气浮导轨端泄气流扰动等因素影响。对驱动电机进行隔振并对气浮导轨加装外罩以避免气浮导轨排出的气流直接对刻划刀具产生影响,进行模拟刻划实验。刻刀单向行程 400 mm,刻划速度 4 r/min,刻划过程中测得一段刀具运动直线度误差曲线如图 6 所示,刻划刀具运动的直线度误差约为 200 nm。而使用石英导轨承载刀架在同样环境条件下刻划速度为 3 r/min 时的直线度误差超过 300 nm,如图 7 所示。从图中还可以看出使用气浮导轨时在高频振动方面有明显改善,有利于对刻刀位置进行实时调整。

为进一步提高光栅刻线精度,使用压电陶瓷实时调整工作台位置对刻刀运动误差进行补偿,并试刻 79 gr/mm 中阶梯光栅,刻划面积 400 mm×500 mm。测量结果如图 8 所示,进行主动控制后刀具运动直线精度峰谷(PV)均值约为 15 nm,其中粗大误差主要来是刻线起点位置刻刀落下时的振动及刻划过程中膜层表面硬点对刻刀造成的。

使用 473 nm 蓝光激光器观察该光栅的衍射光斑,如图 9 所示。使用照度计测量光栅不同位置的杂散光强度,测量结果为 0.2‰~5‰不等。由于光栅的刻划精度同时还受到分度系统误差及光栅基底表面膜层质量等因素影响,可认为使用气浮导轨承载金刚石刀具能够满足光栅刻划的精度要求。

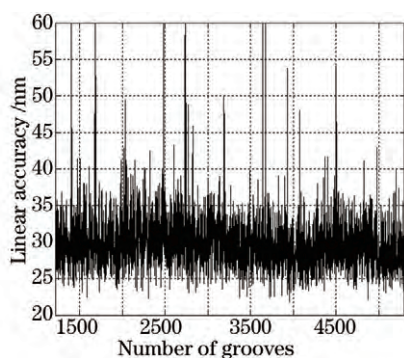


图 8 使用压电陶瓷实时调整后刻划刀具运动直线度误差
Fig.8 Linear movement accuracy of diamond carriage system
after real time adjustment with PZT



图 9 试刻中阶梯光栅的衍射光斑
Fig.9 Diffraction spots of the echelle grating in the
experiment

5 结 论

本文尝试在大型衍射光栅刻划机中使用气浮导轨承载金刚石刻划刀具系统,以避免爬行现象,提高刻划精度,同时避免长时间刻划过程中产生的磨损。将两套完全相同的气浮导轨并联以增加分度方向的刚度,并减少驱动力侧向分量对动导轨的影响。对花岗岩静导轨进行手工修研以降低其直线运动精度误差。使用激光干涉仪测量光栅刻划过程中刻划刀具的直线度误差并绘制运动曲线,测量结果显示当采用隔振、防风等手段减少外界干扰的条件下,刻划行程 400 mm 时刻划刀具运动的直线度误差约为 200 nm,优于原石英刀架导轨,同时高频振动状态有明显改善,有利于通过实时调整工作台位置对刻划误差进行补偿。试刻 79 gr/mm 中阶梯光栅并使用照度计测量其杂散光强度,测量结果表明使用气浮导轨承载金刚石刀具可以满足大光栅刻划的精度要求。

参 考 文 献

- 1 M C Huntley. Diffraction Gratings[M]. London: Academic Press,1982.
- 2 Bayanheshig. The Study on the Dispersion Theory, Design, Manufacture, and Efficiency test of Diffraction Gratings[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004.
- 3 巴音贺希格. 衍射光栅色散理论与光栅设计、制作和检验方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- 4 Yang Zengpeng, Tang Yuguang, Bayanheshig, et al.. Optimization design method for optical system of prism-grating ultraspectral imaging spectrometers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0911003.
- 5 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.

- 4 Yang Chao, Yu Haili, Mi Xiaotao, *et al.*. Development of the workbench yaw angle correction mechanism of large grating ruling machine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1065–1071.
杨 超, 于海利, 糜小涛, 等. 大光栅刻划机工作台的摆角矫正机构研制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1065–1071.
- 5 Liang Haoming. The grating ruling engine of U.S. Kitt Peak observatory[J]. Optics and Precision Engineering, 1984, 4: 22–31.
梁浩明. 美国基特峰天文台的衍射光栅刻划机[J]. 光学机械, 1984, 4: 22–31.
- 6 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.
- 7 Li Zhilai. Analysis and research on performance of enclosed high accuracy air guideway with an unit compensating airspace error[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 1996, 19(4): 41–45.
李志来. 高精度间隙补偿式闭式气浮导轨性能的分析研究[J]. 长春光学精密机械学院学报, 1996, 19(4): 41–45.
- 8 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): 227–234.
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): 227–234.
- 9 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.
- 10 Qi Naiming, Tao Jiasheng, Guan Yingzi, *et al.*. Research on aerostatic guideway error balance[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(1): 61–63.
齐乃明, 陶家生, 关英姿, 等. 气浮导轨误差均化作用的探讨[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(1): 61–63.
- 11 Song Nan, Yao Xuefeng, Feng Shulong, *et al.*. Grind and detection of high-precision double V-type rail[J]. 2013, 34(2): 184–189.
宋 楠, 姚雪峰, 冯树龙, 等. 高精度双V型导轨的研磨与检测技术[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2013, 34(2): 184–189.
- 12 Chi Feng, Zhu Yu, Zhang Zhiping, *et al.*. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 182–188.
池 峰, 朱 煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 182–188.
- 13 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.

栏目编辑: 韩 峰