

文章编号 1004-924X(2013)11-2900-06

大型衍射光栅刻划机刀架系统的设计

陈科位^{1,2*}, 于宏柱¹, 张善文¹, 齐向东¹, 于海利¹, 冯树龙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. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要:设计了一套光栅刻划机刀架系统。该系统将刻划刀具部分安装于能绕鞍形滑块自由转动的安装板上,利用铰链机构来实现了刀架刻划部分与承重部分的分离,降低运动中鞍形滑块的变形、偏移等对金刚石刻刀的影响。分析了刀架运动中产生的误差以及该误差对金刚石刻刀的影响。提出了一种新型检测光路结构,该结构利用双频激光干涉仪测量运动中刀架相对于导向导轨的位移变化。结果显示,刀架单向行程约 70 mm 时,刀架在光栅刻划阶段相对于导向导轨在分度方向的最大位移值约为 60 nm。由于在刻划阶段,膜层对金刚石刻刀存在约束作用,所以金刚石刻刀相对于导向导轨的实际位移会更小。利用新的刀架结构刻制了一块 70 mm×70 mm,600 gr/mm 的衍射光栅,对比利用原刀架结构刻制的光栅,该光栅杂散光强度减弱,质量提高。

关键词:光栅刻划机;刀架系统;双频激光干涉仪;检测光路

中图分类号:TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2900

Design of diamond carriage system for large diffraction grating ruling engine

CHEN Ke-wei^{1,2*}, YU Hong-zhu¹, ZHANG Shan-wen¹,
QI Xiang-dong¹, YU Hai-li¹, FENG Shu-long¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

* *Corresponding author, E-mail: awei_bit@163.com*

Abstract: The diamond carriage system of a grating ruling engine was designed. The diamond lifter part was installed on the plate which could be free to revolve around the saddle-shaped slider. The diamond lifter part and the load-bearing part were separated by the hinge to reduce the error of the diamond position caused by the saddle-shaped slider's deformation and offset. The movement error of the diamond carriage as well as its influence on the diamond position were analyzed, then a optical detection structure was proposed to measure the displacement of the diamond carriage relative to the guide rail at the movement stage by a dual-frequency laser interferometer. The measuring results at the

收稿日期:2013-01-08;修订日期:2013-02-09.

基金项目:国家重大科研装备研制项目(No. ZBYZ 2008-1)

stage of about 70 mm show that the maximum displacement of the diamond carriage relative to the guide rail is up to 60 nm in the ruling stage. As the diamond is constrained by the coatings, the error of the diamond position is even more less. A diffraction grating with 70 mm×70 mm area and 600 gr/mm has been ruled with the changed diamond carriage and it shows a weaker stray light and good quality as compared with traditional gratings.

Key words: grating ruling engine; diamond carriage system; dual-frequency laser interferometer; detection path

1 引言

衍射光栅是一种光学分光元件,广泛应用于各类光谱仪器之中,通过它精确的分光性能,所得光谱能定性定量地反映出所分析材料的成份和含量,是光谱仪器中的核心元件^[1]。当前衍射光栅主要依靠机械刻划和全息曝光的方法制作。机械刻划光栅依靠金刚石刻刀在膜层表面挤压出一系列间距均匀的刻槽,所以对安装金刚石刻刀的刀架系统的结构稳定性以及运行精度要求较高^[2]。

国内外主要的光栅刻划机刀架系统采用“跨桥式”结构。刀架系统横跨工作台两侧,刻刀系统安装于刀架中部,如长春光机所的 1 号,3 号以及 4 号刻划机均采用这种结构。该结构运行稳定,刀桥的扭转对金刚石刻刀影响较小。但结构尺寸较大,不利于大面积光栅的刻制^[3-4]。美国麻省理工学院(MIT)研制的 MIT-C 以及改进的 MIT-B 光栅刻划机,刀桥结构采用圆柱形导轨横跨工作台,金刚石刻刀系统通过套筒悬挂于导向导轨下方,利用一块独立的玻璃导轨作刻刀导向面。该结构简单紧凑,但对圆柱型导轨加工精度要求较高,且对圆柱形导轨与刻刀导向导轨平行性要求较严格,装配精度要求高^[5-9]。本文通过铰链将刀架刻划部分与承重部分相分离,减小作为承重部分的鞍形滑块在运动中产生的误差对金刚石刻刀的影响。同时两部分又共用一个导轨导向面,提高了导向精度。

2 机械结构设计

该结构主要由鞍形滑块,转接块,转动轴,刀架安装板,封闭扭簧,导向滑脚,封闭滑脚以及刻划刀具系统等组成。如图 1 所示,刻划刀具系统

安装于刀架安装板上。刀架安装板通过转动轴能相对鞍形滑块转动,由此可减小鞍形滑块运动中产生的误差对金刚石刻刀的影响。2 个封闭扭簧用于减小由于刀架安装板与转动轴间存在间隙而带来的晃动,提高刀架的运行稳定性。同时,封闭扭簧也将刀架安装板封闭于导轨导向面上。驱动系统推动鞍形滑块在导向导轨上作往复运动。

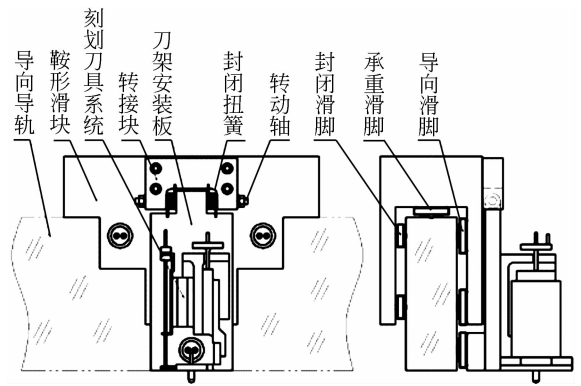


图 1 机械系统结构图

Fig. 1 Image of mechanical system structure

鞍形滑块加工成马鞍形状,骑于导向导轨上,导向导轨横跨工作台。鞍形滑块依靠布置在其承重面对称线上的两个滑脚承受重量。靠近刻划刀具系统一侧采用 3 个呈三角形布置的导向滑脚进行定位,远离刻划刀具系统一侧采用 3 个弹性滑脚进行封闭。该结构相比较于刀架导向导轨分别放在工作台两侧,刀架横跨工作台的形式,结构紧凑,便于增大刀架系统的运行距离,有利于刻制大尺寸光栅。鞍形滑块承重面与导向面集中在同一个导轨上,有利于保证承重面与导向面的垂直性。该方案另一大优点是保证了鞍形滑块导向面与刻划刀具系统导向面共面,避免了由于采用 2 个独立导轨而在安装调试中产生的两导轨平行性误差。综合考虑加工、检测等方面因素,导向导轨采

用热膨胀系数小、表面硬度较高的石英玻璃材料。该导轨承重面与导向面型精度优于 $\lambda/8$ (λ 约为 632.8 nm)。

3 利用激光干涉仪测量运动中刀架安装板相对导向导轨的位移变化

由于直接测量运动中的金刚石刻刀刀尖在分度方向的位移变化较困难,而刻划刀具系统直接固定于刀架安装板上,所以可以通过测量运动中刀架安装板相对于导向导轨的位移变化得到金刚石刻刀刀尖在分度方向的位移。

本文利用双频激光干涉仪进行测量。图 2 为测量光路原理图。干涉计与参考镜通过二维调整支架固定于刀架安装板上,在光栅刻划时跟随刀架往复运动。接收器通过光纤与干涉计出口连接。导向导轨与双频激光器以及接收器固定于刻划机底座上。调整各元器件位置及角度,使激光器出射光路与导向导轨平行,偏振分光镜(PBS)与导向导轨成 45° 角,参考镜与激光器光路垂直。

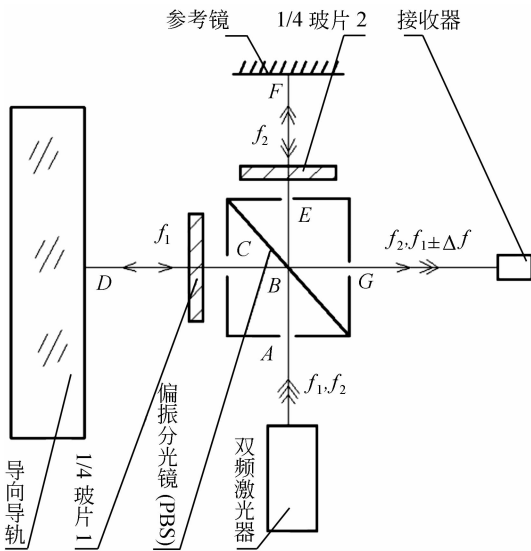


图 2 测量光路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical detection structure

双频激光器发射出频率分别为 f_1, f_2 的两束正交线偏振光,经准直器准直后,由孔径 A 入射到干涉计,干涉计中的偏振分光镜(PBS)将频率为 f_1 的水平偏振光和频率为 f_2 的垂直偏振光正交分离,一束反射,假设其为频率 f_1 的水平偏振

光,经过 $1/4$ 玻片 1 后变成圆偏振光,入射于导向导轨 D 点,反射后再次经过 $1/4$ 玻片 1,变成频率为 f_1 的垂直偏振光,经偏振分光镜透射后由干涉计 G 点出射。另一束频率为 f_2 的垂直偏振光在偏振分光镜处透射,经过 $1/4$ 玻片 2 后变成圆偏振光,入射到参考镜 F 点,反射后再次经过 $1/4$ 玻片 2,变成频率为 f_2 的水平偏振光,经偏振分光镜反射,也由干涉计 G 点出射,两频率光通过光纤入射到接收器。

由于参考镜相对于干涉计位置固定不变,所以其中一束光(频率为 f_2)被接收器接收,经光电转换后作为双频激光干涉仪的参考信号。另一束光(频率为 f_1)将作为测量光束测量刀架安装板相对于导向导轨的距离。当刀架运动时,刀架安装板相对于导向导轨距离发生变化,产生多普勒效应,则测量光束叠加多普勒频移 Δf 后的频率为 $f_1 \pm \Delta f$ 。最后耦合光束被接收器接收,经光电转换后作为双频激光干涉仪的测量信号。测量信号、参考信号经过处理后发送至运算器,将两路信号异或运算后得到由计数器产生的脉冲计数个数 N ,按下式计算即得到位移量 L ,同时将其输出给下一级系统^[10-11]。

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

式中: L 为测量位移值; λ 为激光波长; Δf 为多普勒频移; N 为脉冲计数个数。

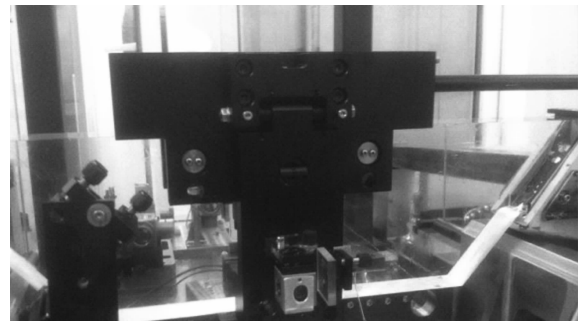


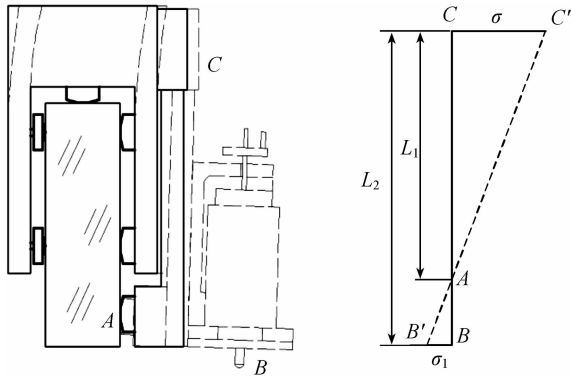
图 3 刀架及测量光路实物图

Fig. 3 Physical figure of the diamond carriage and the optical detection structure

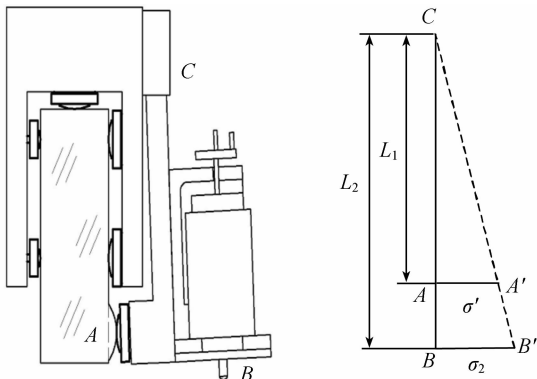
4 误差分析

造成运动中,刻划刀具系统相对导向导轨分度方向位移变化主要有 2 个原因。第一是由于鞍

形滑块在运动中产生扭转,偏移,使得刻划刀尖相对导向导轨在分度方向上位移发生变化。由于设计中刻划刀尖位于鞍形滑块中线上,而推拉杆对鞍形滑块的作用点也位于滑块的中心面上,所以



(a) 鞍形滑块产生偏移或变形对金刚石刻刀位置的影响
(a)Influence of deformation or offset of saddle-shaped slider's on diamond position



(b) 导向导轨误差对金刚石刻刀位置的影响
(b)Influence to the diamond position because of the guide rail's error

图 4 鞍形滑块及导向导轨产生的误差对金刚石刻刀位置产生的影响

Fig. 4 Influence of errors from saddle-shaped slider and guide rail on diamond position

鞍形滑块的扭转对刀尖的影响较小。当鞍形滑块相对导向导轨产生偏移时,如图 4(a)所示,鞍形滑块在铰链处 C 点相对于导向导轨产生偏移量,在封闭扭簧以及铰链的作用下,刀架安装板上的导向滑脚 A 点仍会紧靠导向导轨,此时刀架安装板将以其滑脚为支点产生偏转,形成杠杆原理。假设鞍形滑块 C 点偏移距离为 σ ,根据设计尺寸, L_1 为 146 mm, L_2 为 178 mm,则由此产生的刀尖偏移距离为:

$$\sigma_1 = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \sigma = \frac{178 - 146}{146} \sigma = 0.22\sigma. \quad (2)$$

第二个误差是由导向导轨的导向面引起的。刀架安装滑脚将跟随导向面起伏。此时,安装板将绕铰链处 C 点转动,如图 4(b)所示。假设滑脚处 A 点分度方向移动距离为 σ' ,则由此产生的刀尖偏移距离为:

$$\sigma_2 = \frac{L_2}{L_1} \sigma' = \frac{178}{146} \sigma' = 1.22\sigma'. \quad (3)$$

因为导向导轨整体面型精度较好,局部精度优于 $\lambda/10$,且由于导轨导向面局部凸出或者凹陷带来的误差为固定误差,该误差只能通过提高导轨导向面的面型加工精度来改善。本文主要关注由鞍形滑块的变形以及运动所产生的偏移带来的误差。该结构能降低该误差对刀具的影响。在光栅刻划阶段,光栅膜层对刻划刀具存在约束作用,所以刀尖的偏移距离会更小。

5 实验与验证

在光栅刻划时,每个刻划周期包括两个阶段。一个为刻划阶段,即刻刀在膜层上刻出槽型,另一个阶段为回程阶段,即刻刀离开膜层,分度系统带动光栅移动一个光栅栅距。利用新的刻划系统刻制 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}, 600 \text{ gr/mm}$ 的光栅,刻划速度为 6 gr/min 。通过激光干涉仪在线测量光栅刻制中,刀架安装板相对于导向导轨在分度方向上的位移变化。图 5 为其中某一小段时间内监测的刀架安装板位移曲线图。通过该图可以看出,在光栅刻划阶段,刀架安装板相对于导向导轨最大位

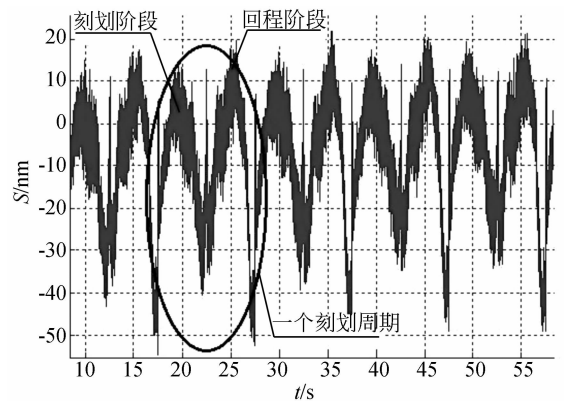
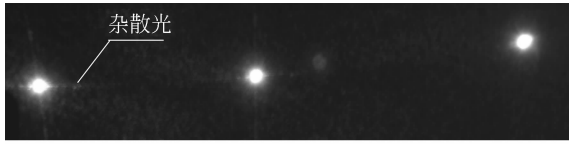


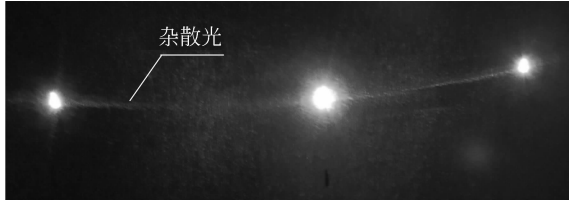
图 5 刀架安装板相对于导向导轨位移

Fig. 5 Displacement of the diamond carriage installation plate relative to the guide rail

移约为 60 nm,在回程阶段,刀架安装板相对于导向导轨最大位移约为 70 nm。



(a) 修改刀架结构后所刻制光栅的衍射光斑
(a) Diffraction spots of the grating ruled by changed diamond carriage



(b) 修改刀架结构前所刻制光栅的衍射光斑
(b) Diffraction spots of the grating ruled by original diamond carriage

图 6 修改刀架结构前后刻制的两块光栅的衍射光斑对比
Fig. 6 Comparison of diffraction spots of the two gratings ruled by changed diamond carriage and original diamond carriage

目前准确测量刻划光栅杂散光强度值较困难,国内一般通过观察光栅的衍射光斑定性判定其杂散光强弱。本文利用波长为 632.8 nm 的

激光观察新刻制光栅的 1 级,2 级,3 级衍射光斑,并与修改刀架结构前所刻制的光栅对比,发现杂散光强度明显减弱,如图 6 所示。刀架结构的改进,明显提高了刻划光栅的质量。

6 结 论

本文根据大型衍射光栅刻划机的精度要求,设计加工了一套新的刀架系统。该系统利用铰链机构,将承重部分与刻划部分分离,降低了鞍形滑块运动误差对金刚石刻刀的影响。同时承重与刻划两部分采用同一个导轨作导向面,避免了采用 2 个独立导轨作导向面时出现的安装不平行误差。针对该结构,设计了一套检测光路,该光路利用激光干涉仪测量运动中刀架安装板相对于导向导轨的位移。测量结果表明,当刀架单向行程约 70 mm 时,在刻划阶段,最大位移约为 60 nm;回程阶段,最大位移约为 70 nm。由于在刻划时,光栅膜层对金刚石刻刀存在约束作用,所以金刚石刻刀相对于导向导轨实际位移更小。利用该结构,刻制了一块 70 mm×70 mm,600 gr/mm 的光栅,与修改刀架结构前刻制的光栅对比,杂散光强度明显减弱,刀架结构的改进明显提高了刻划光栅的质量。

参考文献:

- [1] 梁浩明. 500 mm 衍射光栅刻划机的关键机械结构[J]. 磨床与磨削, 1991(2): 42-44.
LIANG H M. The key mechanical structure of the 500 mm diffraction grating ruling engine [J]. *Grinder and Grinding*, 1991(2): 42-44. (in Chinese)
- [2] 李燕青, 郝德阜. 衍射光栅制造技术的发展[J]. 长春理工大学学报, 2003, 26(1): 66-68.
LI Y Q, HAO D F. Development of diffraction grating manufacture [J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*, 2003, 26(1): 66-68. (in Chinese)
- [3] 祝邵琪. 衍射光栅[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
ZHU S Q. *The Diffraction Grating* [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 1986.

- (in Chinese)
- [4] 梁浩明, 庄夔, 张庆英, 等. 衍射光栅刻划机[J]. 光学学报, 1981, 1(1): 51-58.
LIANG H M, ZHUANG K, ZHANG Q Y *et al.*. The Diffraction Grating Ruling Engines [J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, 1(1): 51-58. (in Chinese)
- [5] GEORGE R H, GEORGE W S. Interferometric control of grating ruling with continuous carriage advance [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1955, 45: 112-121.
- [6] GEORGE R H. The diffraction grating-an opinionated appraisal [J]. *Appl Opt.*, 1973, 12: 2039-2049.
- [7] GEORGE R H, STEPHEN W T, HARRY K. 750-mm ruling engine producing large gratings and echelles [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1972, 62(6): 751-756.
- [8] GEORGE R H. The production of diffraction gratings [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1949, 39(6): 413-426.
- [9] 梁浩明. 美国大型光栅刻划机情况简介[J]. 仪表

技术与传感器, 1984(5):32-34.

LIANG H M. Introduction of the large grating ruling machines in America[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1984(5):32-34. (in Chinese)

- [10] 齐向东,滕丽华,于海利. 丝杠精度双频激光干涉测量中的阿贝误差实时补偿[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(3):279-283.

QI X D, TENG L H, YU H L. Real time compensation of Abbe error in measuring lead screw accuracy by dual-frequency laser interferometer

[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(3):279-283. (in Chinese)

- [11] 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]. 北京:中国科学院研究生院, 2011.

YU H L. *Research on Large Stroke Nan-positioning Technology and Application Based on Dual-frequency Laser Interferometer* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)

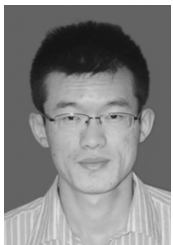
作者简介:



陈科位(1984—),男,四川资阳人,硕士学历,助理研究员,2009年于北京理工大学获得硕士学位,主要从事精密机械结构方面的研究。E-mail: awei_bit@163.com



于宏柱(1977—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事电子学设计、光栅制造设备研制及光谱仪器光电系统设计方面的研究。E-mail: yhz_jl@sina.com



张善文(1980—),男,吉林通化人,博士,副研究员,硕士生导师,2004年于长春理工大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事衍射光栅设计及制作方面的研究。E-mail: zhshwen007@sina.com



齐向东(1965—),男,吉林辽源人,研究员,博士生导师,主要从事光栅刻划机研究及衍射光栅研制方面的研究。E-mail: chinagrating@263.net



于海利(1984—),男,吉林梅河口人,博士学历,助理研究员,2010年于中国科学院长春精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事衍射光栅干涉测量技术的研究。E-mail: yuhailite@163.com



冯树龙(1973—),男,辽宁葫芦岛人,博士学历,副研究员,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事大型衍射光栅刻划机机械及测量系统方面研究。E-mail: topfsl@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)
(本栏目编辑:马 健)