

文章编号 1004-924X(2015)03-0745-08

大型衍射光栅刻划机拉杆结构的分析与改进

糜小涛*, 于宏柱, 于海利, 姚雪峰, 宋楠, 冯树龙, 齐向东
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 由于大型衍射光栅刻划机刻划系统的双拉杆结构不能使其满足精度指标要求, 本文设计了一套单拉杆结构。讨论了石英导轨分度方向弯曲误差产生的原因及其减小该误差的方法, 分析和比较了两种拉杆结构的鞍型滑块的受力情况。基于材料力学弯曲变形理论, 建立了石英导轨分度方向弯曲误差模型。在该模型的基础上仿真了双、单拉杆结构下刻划系统的石英导轨在分度方向上的弯曲变形误差。最后, 使用双频激光干涉仪对石英导轨上的两个特征测量点进行了测量。测量结果显示: 改进后的拉杆结构使得石英导轨在两特征测量点处的位移误差由 50.36 nm 降低到小于 10 nm, 满足大型衍射光栅刻划机刻划系统在分度方向上 5~10 nm 的精度指标要求。

关键词: 光栅刻划机; 衍射光纤; 双拉杆结构; 单拉杆结构; 石英导轨

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0745

Analysis and improvement of rod structures for large diffraction grating ruling engines

MI Xiao-tao*, YU Hong-zhu, YU Hai-li, YAO Xue-feng,
SONG Nan, FENG Shu-long, QI Xiang-dong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: mixiaotao_ciomf@126.com

Abstract: As the double-rod structure in ruling system of a large diffraction grating ruling machine can not meet its accuracy requirement, this paper designs a single-rod structure to substitute it. The reasons of bending error of indexing direction of quartz guide rail in the grating ruling machine were discussed and the method to reduce the error was analyzed. Meanwhile the rod structure and the stress on a saddle slider were analyzed. Then, based on the theory of bending deformation of material mechanics, the model of bending error in indexing direction of quartz guide rail was established. On the basis of this model, the bending errors of quartz guide rails on the double-rod structure and the single-rod structure were simulated. Finally, a frequency laser interferometer was used to measure the two feature points on quartz guide rail. Experimental results indicate that the bendings at the measuring points of quartz guide rail are reduced from 50.36 nm to less than 10 nm by using the

收稿日期: 2014-01-12; 修订日期: 2014-02-20.

基金项目: 国家重大科研装备研制项目 (No. ZBY2008-1); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 11YQ120023); 吉林省重大科技攻关项目 (No. 09ZDGG005); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2014CB049500); 长春市科技计划资助项目 (No. Y3B43HU140)

single-rod structure. It concludes that the single-rod structure basically meets the requirement of large diffraction grating ruling engine for the measuring precision of 5—10 nm.

Key words: grating ruling engine; diffraction optical fiber; double-rod structure; single-rod structure; quartz guide rail

1 引言

衍射光栅作为光谱仪器中的核心元件,被广泛应用于天文、医药、生物、能源、材料、物理和化学等领域^[1-4]。中阶梯光栅是一种刻线密度低、闪耀角大、衍射级次高的特殊衍射光栅,具有高色散、高分辨率、全谱段、高效率等优点,被广泛应用于天文和 ICP 领域,并越来越受各类光谱仪器地青睐。目前,随着天文望远镜的孔径越来越大,天文摄谱仪的分辨率要求越来越高,对中阶梯光栅的面积和光栅刻划机精度要求也愈来愈高^[5-6]。

衍射光栅的制作方法包括机械刻划和全息离子束刻蚀^[7]。由于中阶梯光栅具有低杂散光、衍射效率对刻槽较为敏感和刻槽深的特点,一般均用机械刻划的方法制作^[8-9]。早期的光栅刻划机均为纯机械式,由于机械结构的加工误差、蠕变以及结构运行的摩擦振动等,使得纯机械式光栅刻划机无法刻出大面积、高精度和高分辨率的衍射光栅。随着光栅干涉测量、自动控制等技术的发展,干涉伺服控制技术已被引入光栅刻划机中,从而使光栅刻划机进入了新的时代。国际上具有代表性的高精度刻划机主要有美国 Newport 公司的最高刻线密度可达 10 800 g/mm 的 Michelson 刻划机^[10],日本 Hitachi 公司研制的压电陶瓷精定位工作台的刻线密度最高为 10 000 g/mm 的光栅刻划机以及麻省理工学院研制的电机伺服精定位工作台能够刻划出 400 mm×600 mm 的大面积中阶梯光栅的 MIT-C 机^[11]。国内衍射光栅刻划机刻划光栅的最高刻线密度可达 2 400 g/mm^[12],由于中阶梯光栅的精度相当于刻线密度为 6 000 g/mm 的低级次光栅,因此尚不能刻划出中阶梯光栅。要实现大面积高精度衍射光栅的刻划,就必须具有高精度的光栅刻划机,而且刻划机刻划系统和分度系统均要满足设计时的指标要求。在刻划机研制过程中的实验结果表明,刻划机刻划系统双拉杆结构并不能使得刻划系统满

足精度要求。因此,本文分析了石英导轨分度方向上弯曲误差产生的原因以及减小该误差的方法,设计了新的单拉杆结构;建立了石英导轨弯曲误差分析模型,根据模型对双、单拉杆结构下石英导轨的弯曲误差进行仿真分析。设计了石英导轨弯曲误差实验。实验显示,改进后的单拉杆结构能够有效地减小石英导轨分度方向弯曲误差的问题。

2 刻划机及刻划系统机械结构

光栅刻划机由刻划系统和分度系统组成。刻划光栅是刻划机两系统协同运动下金刚石刻刀在光栅基底铝膜上挤压、抛光成的一种平行的、周期性的浮雕结构。

双拉杆结构刻划系统三维模型如图 1 所示,主要由等速凸轮、下推杆、拉簧、调整旋钮、摆杆、上推杆、双拉杆系统、鞍形滑块、玻璃导轨和刀桥底座等组成。等速凸轮与刻划电机连接,下推杆在等速凸轮和拉簧的作用下将电机的旋转运动转化为下推杆的往复直线匀速运动,进而通过摆杆带动上推杆运动,上推杆通过拉杆结构连接鞍形滑块,带动安装在鞍形滑块上载有刻刀的刀架沿着石英导轨往复匀速运动。通过调整旋钮的位置可以改变上推杆的行程,进而刻划出不同刻槽长度的光栅。该刻划机设计指标是刻划大面积中阶梯光栅,刻划系统的设计指标为:刻槽长度 400 mm,刻划系统在分度方向精度 5~10 nm。

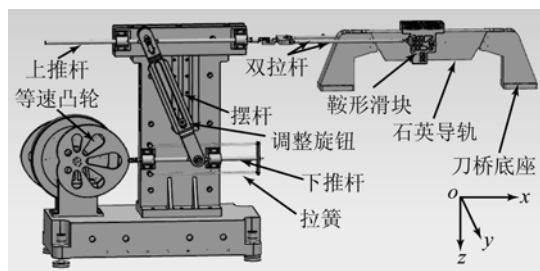


图 1 刻划系统三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of ruling system

3 误差分析

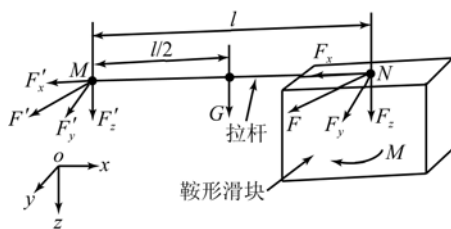
理想的光栅刻线是一组具有同一刻槽形状、平行、周期性直线,但由于分度系统的定位精度、刻划系统的运行精度、系统运行时的随机振动等因素影响,使得实际刻线存在刻槽形状、刻线位置等刻线误差,影响了刻划光栅的质量。

金刚石刻刀安装在鞍形滑块上,沿着高精度的石英导轨往复运动完成光栅刻划。光栅刻划时,由于上推杆与拉杆平行度、上推杆运行直线度以及拉杆重力等的影响,石英导轨会受到使之在分度方向(y 方向)弯曲变形的力和力矩的作用,从而产生弯曲误差,导致光栅的刻线误差。

为了减小石英导轨分度方向弯曲误差,不仅要保证上推杆加工精度以及上推杆和拉杆结构的装调精度,减小使石英在分度方向变形的力,还要有合理地设计拉杆结构和鞍形滑块组件,使石英导轨在分度方向变形的力矩最小。

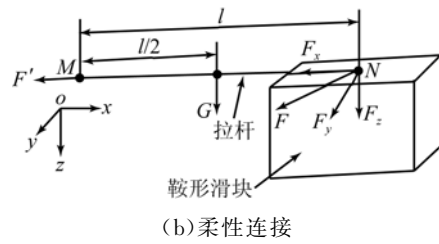
3.1 拉杆结构分析

拉杆结构是上推杆和鞍形滑块之间的连接部件,如图 2 所示,连接方式可分为刚性连接和柔性连接。由于上推杆与拉杆平行度、上推杆运行直线度的影响,上推杆作用在拉杆上的力 F' 存在 y 轴和 z 轴方向的分力,同时受拉杆重力 G 的影响。两种连接方式下力 F' 和力 G 作用到连接点 N 上的力不同:刚性连接方式时连接点 N 上既有具有 3 方向分力的力 F ,也有力 F' 和 G 产生的力矩 M ;柔性连接方式连接点 N 上只有力 F 。可见柔性连接方式消除了力 F' 和 G 产生的力矩对鞍形滑块的影响,降低了石英导轨分度方向的弯曲变形引起的误差。



(a) 刚性连接

(a) Rigid connection



(b) Flexible connection

(b) Flexible connection

图 2 拉杆结构连接方式示意图

Fig. 2 Schematic of rod structure connection

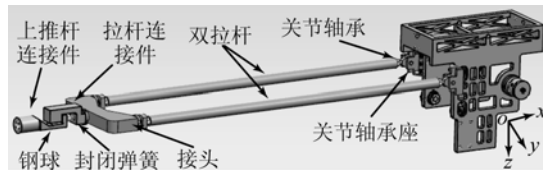


图 3 双拉杆结构

Fig. 3 Double-rod structure

双拉杆结构如图 3 所示,主要包括拉杆以及钢球封闭弹簧柔性环节和关节轴承柔性环节。钢球封闭弹簧柔性环节用来实现拉杆结构绕 z 轴的旋转自由度,关节轴承柔性环节主要保证拉杆结构绕 y 轴的旋转自由度。但上推杆连接件、拉杆连接件与封闭弹簧直接作用,为了减小换向时加速度冲击,封闭弹簧具有一定的刚度,钢球封闭弹簧柔性环节不能很好地保证绕 z 轴的旋转自由度,力矩 $F_y \cdot l$ 没有完全消除,剩余部分记为 M_{z1} 。

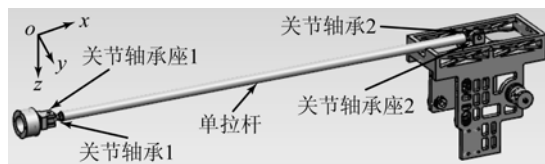


图 4 单拉杆结构

Fig. 4 Single-rod structure

单拉杆结构如图 4 所示,其结构较为简单,由 1 个拉杆 2 个关节轴承组成,两关节轴承在空间上十字垂直交叉安装在拉杆两端,分别用于保证拉杆结构绕 z 轴和 y 轴的旋转自由度。

3.2 鞍形滑块的理想受力位置

鞍形滑块的三维模型如图 5 所示,鞍形滑块是通过 8 个聚四氟乙烯滑脚与石英导轨接触,固定滑脚 1 和滑脚 2 的作用是承重,固定滑脚 3、滑

脚 4 和滑脚 5 用来导向,弹性滑脚 6、滑脚 7 和滑脚 8 用于 y 方向封闭。

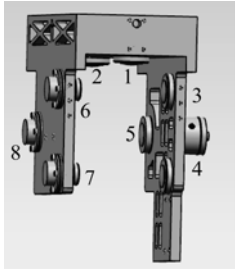


图 5 鞍形滑块的三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model of saddle slider

石英导轨与鞍形滑块直接作用,分析石英导轨弯曲误差,首先要分析鞍形滑块的受力。连接点 N 的力有 F_x 、 F_y 和 F_z , N 点的位置决定作用于 N 点力所产生的力矩的大小。主要分析产生石英导轨分度方向弯曲误差的绕 x 轴力矩 M_x 和产生绕 z 轴力矩 M_z 。

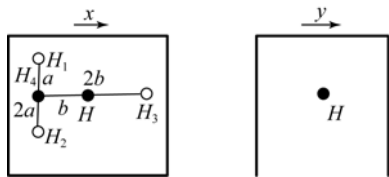


图 6 鞍形滑块理想受力点示意图

Fig. 6 Schematic of ideal stress point of saddle slider

如图 6 所示, H_1 、 H_2 和 H_3 为滑脚的位置, H_4 为 H_1 和 H_2 连线的中点,在平面 $x-o-z$ 的投影上, H 的投影为 H_4 和 H_3 的中点, H 为鞍形滑块的质心。其中最理想的受力点为 H , 此时只有力 F_y 能够使石英导轨产生分度方向的弯曲误差, 各点上的力存在如下关系:

$$2F_{H_1} = 2F_{H_2} = F_{H_3} = F_{H_4} = \frac{F_y}{2} \quad (1)$$

但是由于刻划机整体结构的限制实际采用了如图 3 和图 4 所示的拉杆结构和受力方式。

3.3 双拉杆结构下鞍形滑块的受力分析

鞍形滑块实际受力点如图 7 所示, 其中受力点 1 和 2 为双拉杆结构下鞍形滑块两受力点, 受力点 3 为单拉杆结构下鞍形滑块受力点。

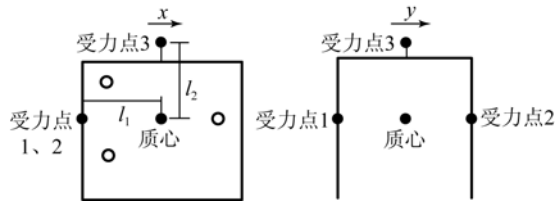


图 7 鞍形滑块实际受力点示意图

Fig. 7 Schematic of real stress point of saddle slider

双拉杆结构鞍形滑块两受力点在通过鞍形滑块质心且平行面 $y-o-z$ 的平面 1 上投影点连线的中点为鞍形滑块质心; 在面 $x-o-z$ 上, 两受力点的投影重合, 距质心的投影距离为 l_1 。

双拉杆结构下鞍形滑块上绕 x 轴和 z 轴的力矩主要包括 3 方面: (1) 钢球封闭弹簧柔性环节处产生的力矩 M_{z1} ; (2) 从鞍形滑块两受力点位置可以看出, 力 F_y 将会产生绕 z 轴的力矩 $F_y \cdot l_1$, 记为 M_{z2} ; (3) 当拉杆结构和鞍形滑块的加工和装配等存在误差时, 力 F' 和双拉杆的重力 G_1 将产生的绕 x 轴和 z 轴的力矩分别记为 M_{x1} 和 M_{z3} 。

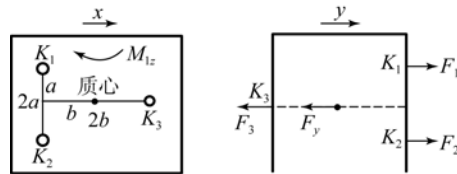


图 8 双拉杆结构鞍形滑块受力分析示意图

Fig. 8 Schematic of ideal stress analysis of saddle slider under the condition of double-rod structure

由于力矩 M_{x1} 和 M_{z3} 较小且主要考虑力矩 M_{z1} (取 M_{z1} 为 $F_y \cdot l$)、 M_{z2} 和力 F_y 的作用, 两力矩之和记为 M_{1z} , 则鞍形滑块受力分析如图 8 所示。图中 K_1 、 K_2 和 K_3 为滑脚位置。由力平衡方程求得:

$$\begin{cases} F_1 = F_2 = \frac{F_y}{4} + \frac{M_{1z}}{2b} = \frac{F_y}{4} + \frac{F_y(l+l_1)}{4b} \\ F_3 = \frac{M_{1z}}{2b} - \frac{F_y}{4} = \frac{F_y(l+l_1)}{2b} - \frac{F_y}{4} \end{cases} \quad (2)$$

3.4 单拉杆结构下鞍形滑块的受力分析

单拉杆结构鞍形滑块受力点和鞍形滑块质心的连线平行于 z 轴, 两点间的距离为 l_2 。

单拉杆结构下鞍形滑块上绕 x 轴和 z 轴的力矩主要包括 2 方面: (1) 从鞍形滑块两受力点位置可以看出, 力 F_y 将会产生绕 x 轴的力矩 $F_y \cdot l_2$,

记为 M_{z1} ; (2) 当拉杆结构和鞍形滑块的加工和装配等存在误差时, 受力 F' 和单拉杆的重力 G_2 的影响, 产生绕 x 轴和 z 轴的力矩分别记为 M_{z2} 和 M_{z3} 。

从双、单拉杆结构下鞍形滑块受力分析对比可以看出: 单拉杆结构改善了钢球封闭弹簧柔性环节产生的力矩 M_{z1} ; 单拉杆结构改善了力矩 M_{z2} 同时引进了力矩 M_{z1} (两力矩引起的误差相当); 从双拉杆结构的复杂程度和双拉杆的质量来看, 力矩 M_{z2} 和 M_{z3} 比力矩 M_{z1} 和 M_{z3} 容易减小。

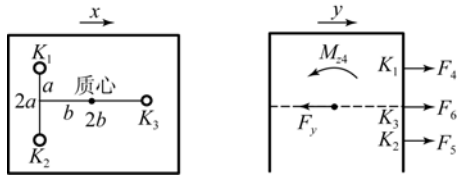


图 9 单拉杆结构鞍形滑块受力分析示意图

Fig. 9 Schematic of ideal stress analysis of saddle slider under the condition of single-rod structure

由于力矩 M_{z2} 和 M_{z3} 较小不好度量, 理论计算时主要考虑力矩 M_{z1} 和力 F_y 的作用, 鞍形滑块受力分析简图如图 9 所示。则由力平衡方程求得:

$$\begin{cases} F_4 = \frac{F_y}{4} + \frac{M_{z1}}{2a} = \frac{F_y}{4} + \frac{F_y \cdot l_2}{2a} \\ F_5 = \frac{F_y}{4} + \frac{M_{z1}}{2a} = \frac{F_y}{4} - \frac{F_y \cdot l_2}{2a} \\ F_6 = \frac{F_y}{2} \end{cases} \quad (3)$$

取 $l = 686 \text{ mm}$, $l_1 = 80 \text{ mm}$, $l_2 = 95 \text{ mm}$, $a = 40 \text{ mm}$, $b = 54 \text{ mm}$, 带入式 (2) 和 (3): $F_1 = F_2 = 3.8 F_y$, $F_3 = 6.84 F_y$, $F_4 = 1.44 F_y$, $F_5 = -0.94 F_y$, $F_6 = 0.5 F_y$, 则有:

$$F_1 = F_2 > F_4 > F_5, \quad (4)$$

$$F_3 > F_6. \quad (5)$$

由式 (4) 和 (5) 知, 单拉杆有效减小了鞍形滑块在 y 方向的作用力, 从而减小了石英导轨沿 y 的弯曲误差。

$$\begin{cases} -EI y_1'' = F_{A1} x - M_{A1}, 0 \leq x < c \\ -EI y_2'' = F_{A1} x - M_{A1} - F_1(x)(x - c), c \leq x < c + d \\ -EI y_3'' = F_{A1} x - M_{A1} - F_1(x)(x - c) + F_2(x)(x - (c + d)), c + d \leq x < l_3 \end{cases} \quad (8)$$

边界和连续性条件为:

$$\begin{cases} x = 0 \text{ 时, } y_1' = 0, y_1 = 0 \\ x = c \text{ 时, } y_1' = y_2', y_1 = y_2 \\ x = c + d \text{ 时, } y_2' = y_3', y_2 = y_3 \end{cases}, \quad (9)$$

3.5 建立石英导轨弯曲误差分析模型

在对鞍形滑块受力分析的基础上, 将石英导轨 y 方向受力和约束情况进行简化, 建立了如图 10 所示的简单超静定结构力学分析模型。该结构仅用静力平衡方程不能求出所有的支座反力 F_A 、 F_B 、 M_A 和 M_B , 必须引入变形协调条件。将 B 点的约束去掉代之为约束力 F_B 和约束力矩 M_B , 转化为如图 11 所示的该结构的静定基, 则静定基变形协调条件为静定基在 B 点的挠度 y_B 和转角为 y_B' 均为 0, 即:

$$y_B = 0, y_B' = 0. \quad (6)$$

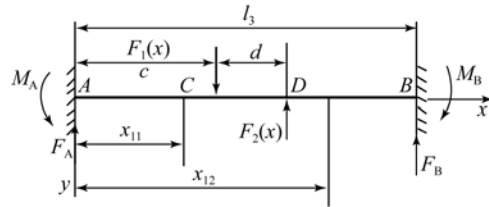


图 10 简单超静定结构示意图

Fig. 10 Schematic of simple statically indeterminate structure

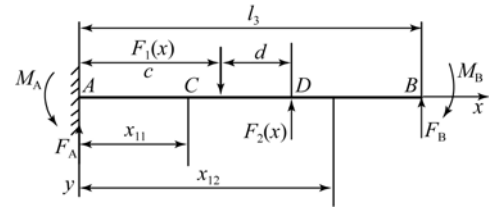


图 11 简单超静定结构的静定基

Fig. 11 Static base of simple statically indeterminate structure

设石英导轨的弹性模量为 E , 长度 l_3 , 高度为 l_h , 宽度为 l_b , 惯性矩 $I = l_b \cdot l_h^3 / 12$ 。

支座反力为:

$$\begin{cases} F_{A1} = F_1(x) - F_2(x) - F_B \\ M_{A1} = F_2(x) \cdot (c + d) + F_B l - F_1(x) \cdot c - M_B \end{cases}, \quad (7)$$

挠曲线近似微分方程为:

将式 (8) 进行积分, 然后联立式 (7) 和 (9) 可求得 y_B 和 y_B' 。将 y_B 和 y_B' 带入式 (6) 可得 F_B 和 M_B 。

用 F_A 、 M_A 、 F_B 、 M_B , 替代式 (7) ~ (9) 中的 F_{1A} 、 M_{1A} 、 F_{1B} 、 M_{1B} , 可得图 8 所示的简单超静定

结构的各支座反力、挠曲线近似微分方程和边界条件,则建立的超静定结构的弯曲分析模型即石

$$y = \begin{cases} \frac{M_A x^2 - \frac{F_A x^3}{6} - C_{01} x - D_{01}}{EI}, & 0 \leq x \leq c \\ \frac{M_A x^2}{2} + F_1(x) \cdot \left(\frac{x^3}{6} - \frac{cx^2}{2} \right) - \frac{F_A x^3}{6} - C_{02} x - D_{02}}{EI}, & c \leq x \leq c+d \\ \frac{M_A x^2}{2} + F_1(x) \cdot \left(\frac{x^3}{6} - \frac{cx^2}{2} \right) - \frac{F_A x^3}{6} - F_2(x) \cdot \left(\frac{x^3}{6} - \frac{(c+d)x^2}{2} \right) - C_{03} x - D_{04}}{EI}, & c+d \leq x \leq l_3 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: F_A 和 M_A 为 A 处的支座反力, C_{01} 、 D_{01} 、 C_{02} 、 D_{02} 、 C_{03} 和 D_{04} 为微分方程积分引进的积分常数(均可通过简单超静定结构的支座反力、挠曲线微分方程和边界条件求解)。

3.6 双、单拉杆结构导致石英导轨弯曲误差仿真

石英导轨的弹性模量为 $E=7.78 \times 10^{10}$ N/m², 长度 $l_3=0.75$ m, 高度 $h=0.08$ m, 宽度 $b=0.17$ m, $b=0.108$ m, 设 $F_y=5x$ 。

(1) 石英导轨弯曲误差仿真

双拉杆结构 $F_1(x)=2F_1=7.6 F_y$, $F_2(x)=F_3=6.84 F_y$; 单拉杆结构 $F_1(x)=F_6=0.5 F_y$, $F_2(x)=-0.5 F_y$ 。则双、单拉杆结构下刻划系统刻划时, 石英导轨弯曲误差曲线如图 12 所示。

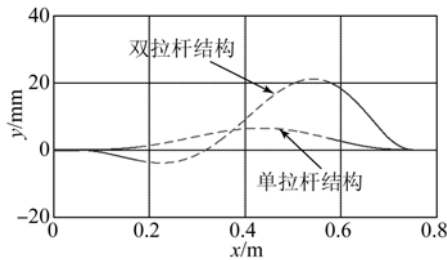


图 12 石英导轨弯曲误差仿真曲线

Fig. 12 Simulation curves of bending error of quartz guide

图中虚线为光栅刻划段(刻槽长度为 400 mm)石英导轨弯曲误差曲线。双拉杆结构 $\Delta y_1 = y_{1\max} - y_{1\min} = 24.993$ nm, 单拉杆结构 $\Delta y_2 = y_{2\max} - y_{2\min} = 5.667$ nm, 显然双拉杆结构不满足精度 5~10 nm 的指标要求, 单拉杆满足。

(2) 测量点处位移误差仿真

把石英导轨 x 方向中间点记作特征测量点 1, x 方向距中间点 200 mm 处点记作特征测量点 2, 通过测量刻划机运行时两测量点处 y 方向的位移来间接反映石英导轨的弯曲误差, 则双、单拉

英导轨的弯曲误差模型为:

杆结构下, 刻划系统进行光栅刻划时测量点处的位移误差仿真曲线如图 13 和 14 所示。

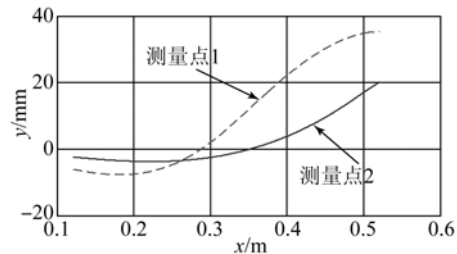


图 13 双拉杆结构两测量点处位移仿真曲线

Fig. 13 Simulation curves of two displacement measuring points under the condition of double-rod structure

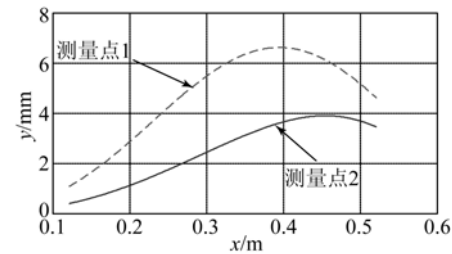


图 14 单拉杆结构两测量点处位移仿真曲线

Fig. 14 Simulation curves of two displacement measuring points under the condition of single-rod structure

由图 13 和 14 可知, 测量点 1 在 y 方向的位移要大于测量点 2 在 y 方向的位移; 双拉杆结构测量点处位移均大于单拉杆结构测量点处位移; 通过两测量点 y 方向的位移可以反映石英导轨弯曲误差, 进而可知光栅刻线是否满足指标要求。

4 实验分析

4.1 实验光路设计

实验光路如图 15 所示, 在两特征测量点处各固定 1 个平面镜。双频激光干涉仪发出的激光由

50%分光镜和折光镜分为2束,分别经过两路干涉仪入射到固定在石英导轨的2个测量镜上。光路中的参考镜(集成在干涉仪中)位置不变,则参考光束频率不变;如果石英导轨发生 y 方向的弯曲,则平面镜在 y 方向存在位移,将产生多普勒效应,测量光束叠加1个多普勒频移 Δf ,然后测量光束和参考光束进行处理,可得石英导轨在测量镜1处和测量镜2处的 y 方向位移。

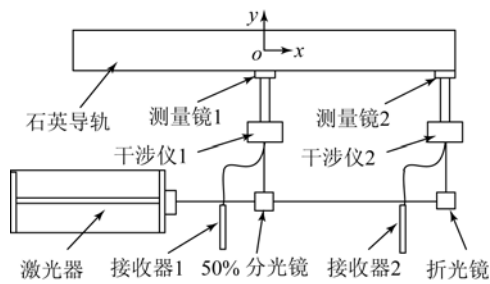


图15 实验光路原理图

Fig. 15 Schematic of optical path for experiment

4.2 实验结果与分析

实验时刻划电机转速 $n=3 \text{ r/min}$,刻划系统运行时双、单拉杆结构结构下石英导轨两测量点处的 y 方向位移曲线如图16和17所示。

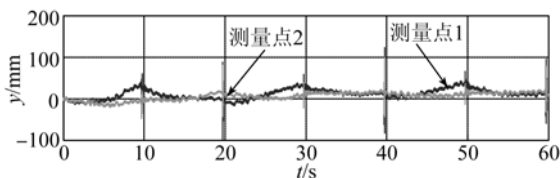


图16 双拉杆结构两测量点位移曲线

Fig. 16 Curves of two displacement measuring points under the condition of double-rod structure

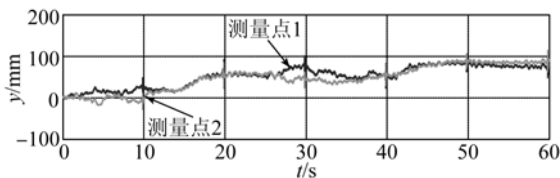


图17 单拉杆结构两测量点位移曲线

Fig. 17 Curves of two displacement measuring points under the condition of single-rod structure

参考文献:

[1] 陈科位,齐向东,冯树龙,等.大型衍射光栅刻划机等速系统的设计[J].光学精密工程,2011,19(1):

由图16可知,双拉杆结构下,两测量点测量曲线呈现周期性的锯齿状,在刻划系统刻划阶段石英导轨位移最大值分别为50.36 nm和20.71 nm。测量点1的石英导轨的位移均要比测量点2大。两测量点处石英导轨位移均大于刻划机刻划系统在分度方向精度5~10 nm,不满足刻划系统技术指标要求。

由图17可知,单拉杆结构下,两测量点处石英导轨弯曲基本一致,满足刻划系统技术指标要求,图中曲线没有周期性的锯齿状,曲线弯曲均由环境如温度等造成的。

对比图16和图17可得,刻划系统刻划阶段石英导轨两测量点处的位移误差已从双拉杆结构约为50.36 nm改进至单拉杆结构石英导轨弯曲的满足指标要求。实验结果和理论仿真基本相符。

5 结论

本文根据光栅刻划机刻划系统精度指标要求,在理论分析和实验数据的基础上对拉杆结构进行改进。论述了石英导轨弯曲误差最小时的拉杆结构和鞍形滑块受力位置,并对双、单拉杆结构下鞍形滑块的受力进行分析和对比。给出了石英导轨弯曲误差分析方法,建立其误差分析模型即简单超静力学分析模型,并对石英导轨的弯曲误差进行仿真。提出了运用激光干涉仪测量石英导轨两特征测量点位移来间接测量石英导轨弯曲的方法,设计了双、单拉杆结构下石英导轨弯曲误差测量实验及实验光路。实验结果证明:双拉杆结构下石英导轨弯曲误差存在明显的锯齿状,在刻划系统刻划阶段石英导轨测量点处最大位移误差为50.36 nm,不满足指标要求;单拉杆结构下石英导轨弯曲误差约为5~10 nm,满足精度指标要求;拉杆结构的改进明显提高了刻划机刻划系统的精度。

72-77.

CHEN K W, QI X D, FENG SH L, et al.. Design of constant speed system for large diffraction grating ruling engine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (1):72-77. (in Chinese)

- [2] 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.
LI X T, BAYANHESHIG, QI X D, *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. (in Chinese)
- [3] YU L, SHU R W, QU Y, *et al.*. Study on spectral broadband aberration corrected imaging spectrometer for farultraviolet waveband [J]. *Opt. Eng.*, 2011, 50(6): 063002.
- [4] 张宝庆, 史国权, 石广丰, 等. 衍射光栅机械刻划工艺理论分析与实验研究 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(1): 1-6.
ZHANG B Q, SHI G Q, SHI G F, *et al.*. Theoretical analysis and experimental research of grating mechanical depicts process [J]. *The Journal of Metallography*, 2014, 25(1): 1-6. (in Chinese)
- [5] 唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1989-1994.
TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1989-1994. (in Chinese)
- [6] 唐玉国, 陈少杰, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的谱图还原与波长标定 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2130-2136.
TANG Y G, CHEN SH J, BAYANHESHIG, *et al.*. Spectral reducing of cross-dispersed echelle spectrograph and its wavelength callibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2130-2136. (in Chinese)
- [7] 张庆宝, 史国权, 石广丰, 等. 衍射光栅机械刻划成槽的预控试验 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1666-1675.
ZHANG B Q, SHI G Q, SHI G F, *et al.*. Precontrol of mechanical scratching diffractive grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1666-1675. (in Chinese)
- [8] 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.
LI X T, BAYANHESHIG, QI X D, *et al.*. Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve error, location error on plane grating' performance [J]. *Chinese Journal of Lasers*. 2013, 40(3): 0308009. (in Chinese)
- [9] 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.
CHEN K W, YU H ZH, ZHANG SH W, *et al.*. Design of diamond carriage system for large diffraction grating ruling engine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2900-2905. (in Chinese)
- [10] EEWIN L. *Diffraction Grating Handbook* [M]. New York: Newport Corporation, 2005.
- [11] GEORGE R, HARRISON, ERWIN G. Echelle gratings: their testing and improvement [J]. *Applied optics. Am.*, 1976, 15(4): 971-976.
- [12] 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.
CAI J D, WANG Y, YAN T M, *et al.*. Closed-loop control system for diffraction grating ruling machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2416-2423. (in Chinese)

作者简介:



糜小涛(1988-)男, 博士研究生, 研究实习员, 2012年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事光栅刻划机械系统研究。E-mail: mixiaotao_ciomp@126.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及衍射光栅方面的研究。E-mail: chinagrating@263.net