

文章编号 1004-924X(2023)13-1941-09

光栅刻划刀具弹性支撑机构颤振抑制性能优化

于 硕, 王 玮, 李文昊, 吉日嘎兰图*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 国家光栅制造与应用工程技术研究中心,
吉林 长春 130022)

摘要:机械刻划是以中阶梯光栅为主导的大闪耀角、高衍射级次光栅的主要加工方法,其大闪耀角特性使中阶梯光栅的刻划加工难度大幅增加。当光栅刻划刀对刀误差较大,或刀具非力平衡设计时,刻划过程中刀具会受到较大水平扭矩,易导致刀具颤振现象,从而影响光栅质量。为抑制刀具颤振,提高光栅刻划稳定性,针对光栅刻划刀具弹性支撑机构的颤振抑制性能开展研究,提出了双层平行弹簧支撑机构。通过有限元仿真对比分析了新旧刀架机构的结构刚度和模态特性,并利用加速度传感器测试了两种刀架机构的刻划刀具颤振状态,对比了两种刀架对颤振的抑制效果。结果表明,双层平行弹簧刀架机构受刻划扭矩时,在刀具夹持处及柔性铰链处的变形较传统刀架结构分别减少了 36% 和 24%,一阶模态提升了 2.8 倍。颤振信号在时域下基线两侧幅值分别降低了 13.6% 及 22.5%。光栅刻划实验表明,新机构有利于刻划制造中阶梯光栅,所提出的刀架优化设计方法和颤振抑制技术可为光栅刻划制造技术提供理论指导。

关键词:机械刻划法;刻划刀架;颤振信号;中阶梯光栅

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233113.1941

Optimization of chatter suppression performance of elastic support mechanism for grating ruling tools

YU Shuo, WANG Wei, LI Wenhao, JIRIGALANTU*

(National Engineering Research Center for Gratings Manufacturing and Application,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: jiri5998@163.com

Abstract: Mechanical ruling is the main processing method for gratings with a large blaze angle and high diffraction order, such as echelle. The large blaze angle of echelle makes its ruling process difficult. When the angle between the ruling tool edge direction and the ruling direction exceeds the error or when the ruling tool is designed without force balance, the tool undergoes a large horizontal torque during the ruling process, which can easily lead to tool chatter, affecting the quality of the gratings. To suppress the tool chatter and improve the stability of the grating ruling process, the chatter suppression performance of the grating ruling tool elastic support mechanism is evaluated in this study, and an innovative double-layer parallel hinge tool carrier is proposed. The structural stiffness and modal characteristics of the new and old tool carriers are compared and analyzed through finite-element simulation. The chatter state of the two

收稿日期:2022-12-06;修订日期:2023-02-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62075216);中国科学院战略性先导科技专项(C类)资助(No. XDC04000000)

tool holders is measured using an acceleration sensor, and the chatter suppression effects of the two tool holders are compared. The results indicate that when the double-layer parallel spring tool carrier is subjected to the ruling torque, the deformation at the tool clamping position and the flexure hinge is reduced by 36% and 24%, respectively, compared with the previous structure, and the first-order mode is increased by a factor of 2.8. The amplitude of the flutter signal on both sides of the baseline is reduced by 13.6% and 22.5%, respectively, in the time domain. The test results confirm that the proposed mechanism is advantageous for echelle ruling. The proposed tool carrier optimization design method and flutter suppression technology provide new theoretical guidance for grating ruling technology.

Key words: mechanical ruling method; ruling tool carrier; chatter signal; echelle grating

1 引 言

光栅是光谱分析、光学遥感及精密位移测量等领域精密仪器的核心器件,具有将复色光按波长空间分离为单色光的功能^[1-8]。一些特殊的三角槽形闪耀光栅如中阶梯光栅等,需采用机械刻划的方式进行制备。金刚石刻划刀安装在刻划刀架上,随刻划系统做往复匀速运动,分度系统的工作台承载光栅基底协同做单向步进运动,在一定载荷下金刚石刻划刀利用主刃、定向面侧刃、非定向面侧刃对光栅基底上的金属镀层(如铝膜)进行挤压、擦光,使它最终发生塑性形变而形成阶梯形状的刻槽^[9]。刻槽的形状与刀具自身的几何参数及刀具的安装工艺参数相关。

光栅的刻划制作有别于切削加工技术,是依靠挤压成形机理实现光栅槽形的制备,刻划过程中并不产生切屑^[10],但容易出现类似于切削、铣削等加工中的刀具颤振现象。在刻划刀对刃误差较大或刀具非力平衡设计时^[11],光栅刻槽易呈现出周期性波动现象,在高倍显微镜下可观测到光栅定向面或非定向面槽形在刻划方向上发生弯曲,或刻线产生明暗相间的阴影。这会严重影响刻线的直线性,致使光栅产生罗兰鬼线,影响使用性能。除了刀具扭矩平衡设计之外,解决此类问题最好的途径是通过刻划刀架对刻划刀颤振进行抑制。因此,刻划刀具弹性支撑机构的抑颤振优化设计是中阶梯光栅等高精度刻划光栅研制中迫切需要解决的难题之一。

目前,颤振的识别主要分为直接识别和间接识别两种^[12]。其中,直接识别主要通过相机和表面探测设备等对加工零件表面进行检测;间接方式通过识别加工过程中的动态信息,反映加工状

态来判断是否发生颤振^[13]。间接识别主流的探测手段有力学信号获取、电流信号获取、声音信号获取及加速度信号获取等。Huang 等^[14]通过探测铣削力信号来识别颤振,得到了加工中的颤振频率,并分析了不同频率下铣削力对颤振的影响。Feng 等^[15]同样对铣削过程中的径向铣削力信号进行探测分析,得出高频波段可以反映切削力信号突变的结论。赵彤等^[16]建立了球头铣刀对薄板铣削时的动力学模型,获取了稳定性叶瓣图,并利用加速度传感器获取铣削时的信号,经傅里叶变换后找寻系统主轴频率及其倍频外的大幅值颤振频率。Chockalingam 等^[17]利用振动传感器获取不同工艺参数、不同材料的阻尼块在加工中的颤振信号,并利用有限元仿真软件对结构的模态进行了分析。石广丰等^[18]通过力信号传感器,从能量的角度对光栅刻划过程中的颤振进行识别,并依据实验结果得到了临界刻划速度。基于声音信号的间接探测颤振信号方法可获得的信号域广^[13,19],但显然不适用于低速挤压加工,故不做探究。在直接识别方面,陈磊等^[20]采用机器视觉的方式获取飞行器的颤振信号,利用系统参数自校准方法提升精度,最终测量精度为 0.1 m。李茂月等^[21]利用图像处理的方式识别薄壁件铣削颤振,辨识准确性可达 95.5%,算法运行时间短。但这些方法受限于相机分辨率,很难识别微纳米级别的目标尺寸。

综上,结合光栅机械刻划低速、低载荷微纳尺度的挤压成形特点,本文利用加速度信号探测光栅刻划过程中的颤振状态,通过有限元分析软件对光栅刻划刀架的刚度及力学特性进行分析,针对薄弱环节进行优化,开发了双层平行弹簧刀架机构,并对传统弹性支撑机构和新型刀架机构

的模式、受刻划扭矩时的形变及刻划过程中的颤振状态进行了比较,通过实际光栅刻划实验验证了双层平行弹簧刀架机构在中阶梯光栅刻划制造中的优势。

2 工作状态分析

光栅刻划过程中的颤振现象多发生于光栅刻划刀对刃误差较大的时候,如图 1 所示。尤其是传统刻划工艺认为大闪耀角光栅槽形的挤压成形需要刻划刀主刃与刻划方向成一定的偏转角,这样有利于闪耀面的隆起成形,但在光栅的刻划过程中会不可避免地引起水平方向上的偏转扭矩,导致刻划颤振现象。

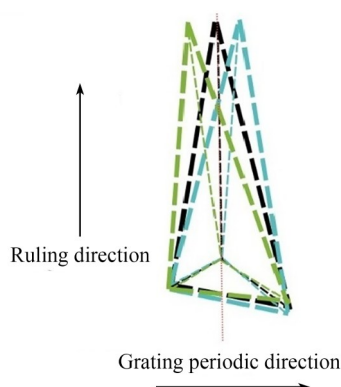


图 1 刀具刻划偏转角度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ruling tool deflection

目前的刻划刀架结构如图 2 所示,其最大外形尺寸为 72 mm×60 mm×37 mm,主要分为主刀架区域及副刀架区域。主刀架区域主要用来连接刀架及刻划机的刻划机构,副刀架主要用来夹持刻划刀具,并实现刻划过程中的抬落刀动

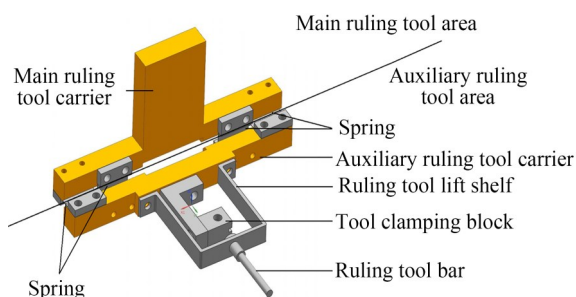


图 2 光栅刻划刀架结构示意图

Fig. 2 Structure of grating ruling tool carrier

作,其中两区域间利用弹簧片进行柔性连接,为刻划过程提供柔性缓冲,以防刀具损坏。两区域分别通过螺钉压紧与弹簧片进行固定,共采用了 8 组 16 个螺钉。刻划过程中刀架主要受到两种力,一种为刻划时由光栅基底反馈来的刻划力 F ,分别作用于刀具的定向面、非定向面以及各刀刃上。结合弹簧片的变形状态,可简化为竖直向上的力 F_z 及水平刻划扭矩 M_{xy} 。

刻划过程中,刀架系统振动在单个方向上可简化成一个经典的单自由度线性振动系统,如图 3 所示。其中, m 表示质量, k 为刚度, c 为阻尼。在外力 $F(t)$ 的作用下,此系统的运动方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + ks = F(t), \quad (1)$$

其中质量 m 以及刚度 k 共同决定了系统的固有频率:

$$\omega_n = \sqrt{k/m}. \quad (2)$$

阻尼比为 $\xi = c/2\sqrt{km}$, 系统中总有 $\xi < 1$, 此时固有频率为:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}. \quad (3)$$

Altintas 学者认为易发生颤振的频率与工艺系统的固有频率接近^[22]。换言之,通过提升刻划刀架系统的刚度可在很大程度上抑制颤振现象的发生。对于竖直方向的刻划力 F_z , 可以通过增加刻划负载, 改变刀具的俯仰角来抑制颤振; 而水平方向的刻划扭矩 M_{xy} , 则需通过改善刻划刀架的刚度来抑制。其中, 连接主、副刀架的弹簧作为柔性支撑机构是影响整体刚度的关键部件^[23-24]。目前, 铰链为十字铰链形式, 竖直方向放

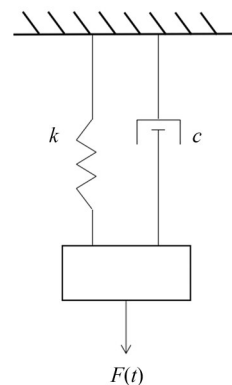


图 3 刻划刀架单弹簧片等效系统

Fig. 3 Equivalent system of single spring for ruling tool carrier

置的弹簧为薄弱环节,基于此提出了一种新结构的刀架,如图4所示。同样采用8组16个螺钉进行固定,不同的是将弹簧片均水平放置,形成平行簧片结构形式,此种形式的刀架虽然在竖直方向上牺牲了一些柔性,但在水平方向上增加了刚度。

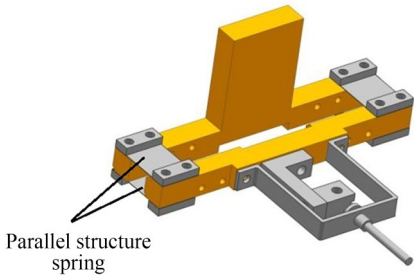


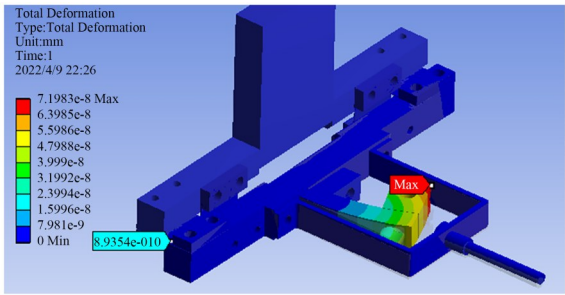
图4 具有平行簧片结构的刻划刀架

Fig. 4 Grating ruling tool carrier with parallel spring

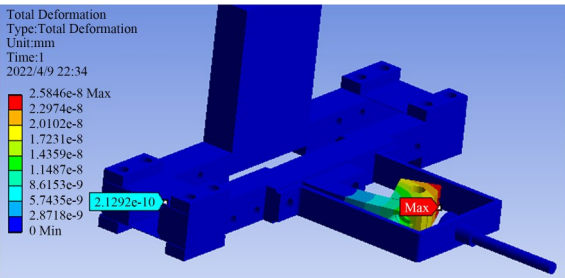
3 有限元仿真

3.1 两刻划刀架扭矩形变分析

对两种刀架在刀具夹持位置加载水平方向弯矩,大小为 $5 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。对主刀架区域加载 Fixed Support 约束。刀架主副刀架部分材料设定为结构钢,泊松比为0.3,弹性模量为 $2 \times 10^5 \text{ MPa}$,密度为 7.85 g/cm^3 。弹簧片部分设置为65 Mn,其泊松比为0.288,弹性模量为 $1.97 \times 10^5 \text{ MPa}$,密度为 7.81 g/cm^3 。经网格划分后,十字簧片刀架单元数为100 601,网格节点数为201 982,双层平行簧片单元数为102 246,网格节点数为209 393。最终的仿真结果如图5所示,通过更改柔性铰链结构不但可以降低簧片的形变,还可以减小刀架中刀具夹持架的形变。由获取数据可知,十字簧片刀架在簧片处的变形为 $8.935 \times 10^{-10} \text{ mm}$,刀具夹持部分的最大变形为 $7.198 \times 10^{-8} \text{ mm}$,而平行簧片分别为 $2.129 \times 10^{-10} \text{ mm}$ 和 $2.584 \times 10^{-8} \text{ mm}$ 。变形较小是由于输入的扭矩为理想刻划扭矩,当发生外部干扰时数量级会显著提升。经计算,相较于十字簧片结构的刻划刀架,平行簧片结构在其夹持部分的变形约为前者的36%。在铰链位置约为前者的24%。整体表现出更小的形变,更有利于减小受扰动时刀架系统的内部激励,改善颤振现象。



(a) 十字簧片刀架
(a) Cross-spring ruling tool carrier



(b) 双层簧片刀架
(b) Parallel-spring ruling tool carrier

图5 两种刀架在 $5 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{mm}$ 刻划弯矩下的应变云图
Fig. 5 Strain nephogram of two carriers with ruling moment of $5 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{mm}$

3.2 两刻划刀架模态及振型分析

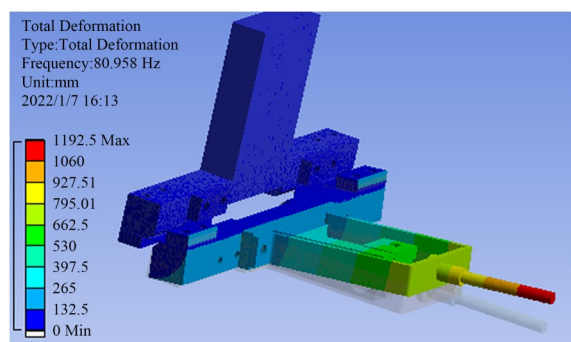
为探究两刻划刀架刚度上的差异,对两种刀架进行了模态分析,获得的两者前4阶模态如表1所示,前4阶振型如图6及图7所示。

表1 两种刀架的前四阶固有频率

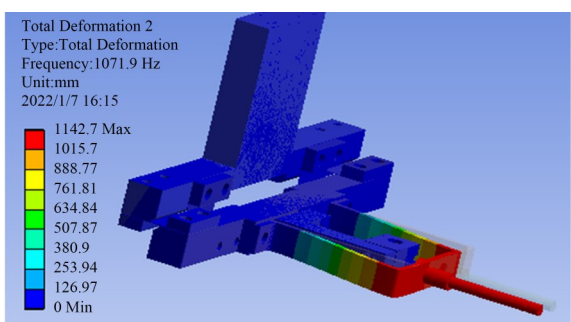
Tab. 1 First four natural frequencies of two carriers

模 型	一阶频率	二阶频率	三阶频率	四阶频率
十字簧片	81.0	1 071.9	2 299.8	2 642.0
双层簧片	224.6	981.8	1 067.0	1 568.7

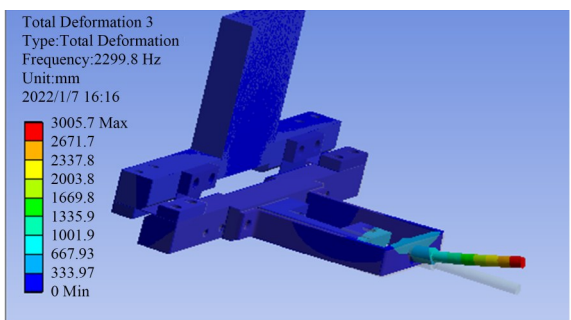
由表1可以看出,平行簧片刀架的1阶固有频率增大,提高了2.8倍,刚度有了很大的提升;虽然后几阶频率低于十字簧片,但其数值已在1 000 Hz左右,不易产生共振。说明在受外界激励过程中双层平行簧片结构更加稳定,可减轻颤振现象,减小颤振幅值。平行簧片相比于十字交叉簧片,一阶振型是整体副刀架区域的竖直方向平移运动,而非转动,且位移量更小。这样在刻划刀架受激励发生颤振时,并不会改变刀具的俯仰角度,也不会加剧系统的失稳状态。



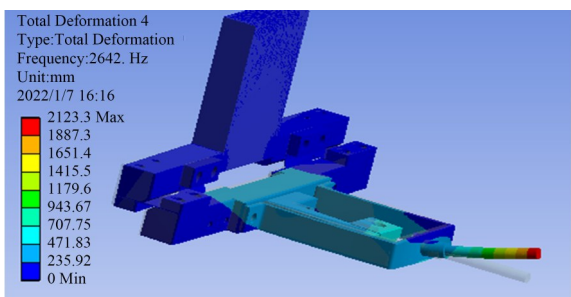
(a) 一阶振型
(a) First modal



(b) 二阶振型
(b) Second modal

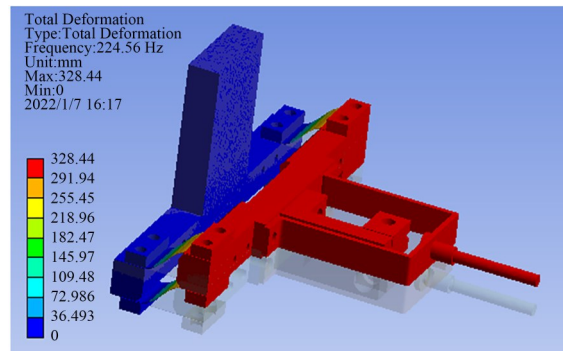


(c) 三阶振型
(c) Third modal

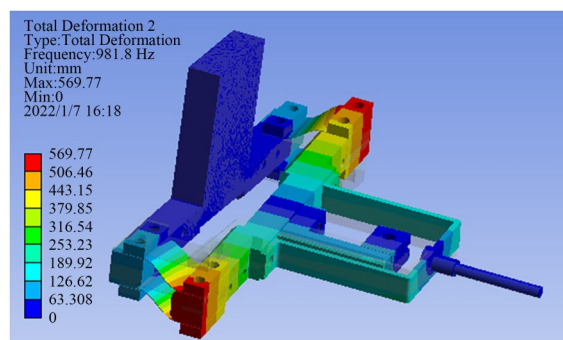


(d) 四阶振型
(d) Fourth modal

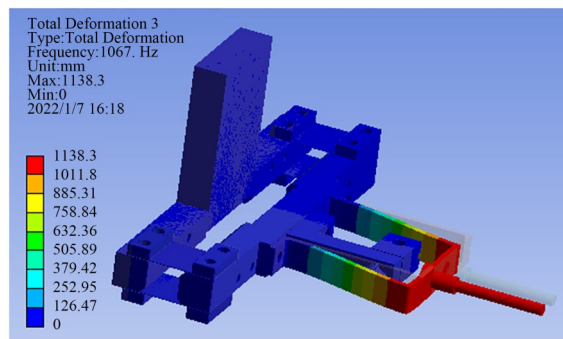
图 6 十字簧片刀架前四阶振型
Fig. 6 First four vibration modes of ruling tool carrier with cross spring



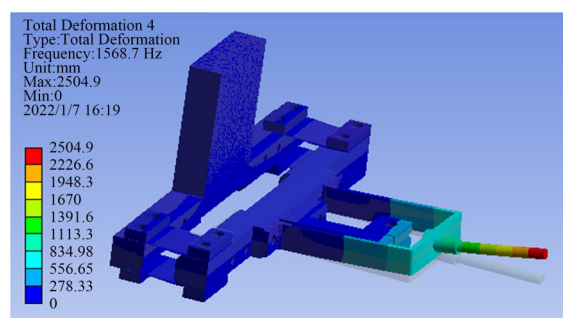
(a) 一阶振型
(a) First modal



(b) 二阶振型
(b) Second modal



(c) 三阶振型
(c) Third modal



(d) 四阶振型
(d) Fourth modal

图 7 平行簧片刀架前四阶固有频率
Fig. 7 First four vibration modes of ruling tool carrier with parallel spring

4 两刀架刻划颤振信号探测对比

4.1 实验装置

为验证实际光栅刻划中刀具弹性支撑机构对颤振的抑制效果,搭建了颤振信号探测装置,如图 8 所示。在环境温度 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,利用长光所 CIOMP 5 号刻划机进行刻划实验,环境温度控制精度可达 $\pm 0.02^{\circ}$,选用制作大闪耀角中阶梯光栅的刻划刀具,定向角约为 64° 。分别将刀具安置在平行簧片刀架及十字簧片刀架上进行刻划实验,选用 ZD-570D 超小型加速度传感器,利用紧定螺钉安装于刀具刀杆上,直接对刀具上的颤振信号进行探测,经配套放大器处理后将信号传输至 DI-710 系统中,最终经电脑软件处理并记录。

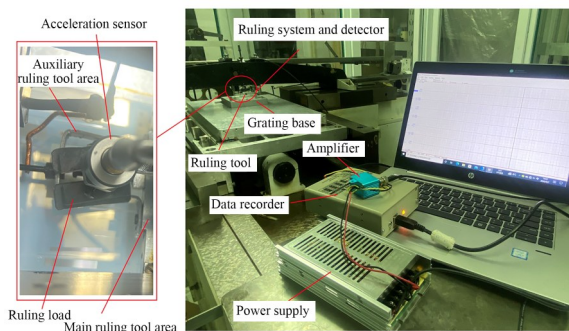


图 8 刻划颤振实验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of ruling chatter test devices

4.2 实验过程及结果

利用两种刀架在相同的安装角度下进行了光栅刻划实验。刻划过程为周期性的往复运动,主要分为刻划及返程两部分。刻划过程中,首先经落刀动作使刻划刀具与光栅基底上的铝膜接触,经刻划形成单条刻线,返程过程中经抬刀动作使刀具脱离铝膜表面,并返程回到刻划原点,在分度系统的配合下行进至下一条刻线起点。两种刀架均进行了多刻划周期的信号探测。

由于光栅刻划机的整机结构布局已使刻划工作区域远离了电机等激励源,外界因素对刻划系统鲜有干扰,抑制颤振只能通过提升刻划系统部件的刚度实现,故无需关注颤振信号的频域信息,直接进行幅值域分析即可。最终获得的时域信号结果如图 9 及图 10 所示。

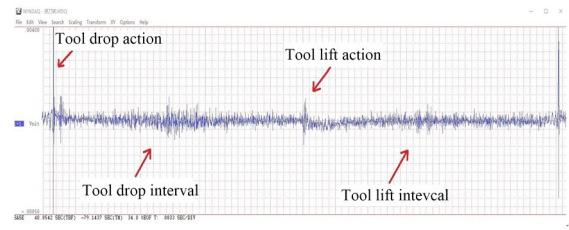


图 9 十字簧片刀架颤振信号

Fig. 9 Chatter signal of ruling tool carrier with cross spring

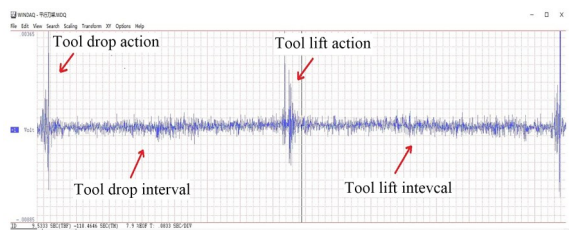


图 10 平行簧片刀架颤振信号

Fig. 10 Chatter signal of ruling tool carrier with parallel spring

通过颤振信号可以明显地观测到抬刀及落刀动作,且落刀刻划区间的振动明显大于抬刀区间,验证了振动信号采集的正确性。两种刀架抬落刀信号幅值不同是由于两刀架的抬刀杆距离光栅基底竖直位置存在差异,故刻划刀具抬落时距离基底表面的位置不同,并不影响刻划状态。从图 10 可知,平行簧片在落刀区间发生振动的范围更窄,幅值更小,说明它在抑制颤振上具有更好的效果。进一步,针对 5 组落刀抬刀动作,分别提取出刻划区间内的最大幅值,如表 2~表 3 所示。5 组实验数据均表明,双层平行弹簧刀架机构在相同工艺参数下的刻划振动幅值更小,在基线两侧的最大幅值分别减小了 13.6% 及 22.5%。

最终在环境温度 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,利用长光所 CIOMP 5 号刻划机进行刻划实验,所用光栅基底铝膜镀制厚度为 $4\text{ }\mu\text{m}$,选用制作大闪耀角中阶梯光栅的刻划刀具,定向角约为 64° ,将刀具安装角度调节至不发生颤振现象的理想状态,利用平行簧片弹性支撑机构刀架,进行了光栅刻划实验,用以验证它在结构变化后是否会影响光栅的挤压成形过程,所刻划目标光栅参数为光栅刻线密度

表 2 十字簧片刀架刻划过程最大幅值数据

Tab.2 Maximum amplitude data of ruling tool carrier with cross spring during ruling process

实 验	十字簧片刀架基线	十字簧片刀架基线
	上半部最大幅值	下半部最大幅值
1	1.66×10^{-3}	1.32×10^{-3}
2	1.19×10^{-3}	1.45×10^{-3}
3	1.53×10^{-3}	1.29×10^{-3}
4	1.22×10^{-3}	1.38×10^{-3}
5	1.22×10^{-3}	1.27×10^{-3}
平均值	1.364×10^{-3}	1.342×10^{-3}

表 3 平行簧片刀架刻划过程最大幅值数据

Tab.3 Maximum amplitude data of ruling tool carrier with parallel spring during ruling process

实 验	平行簧片刀架基线	平行簧片刀架基线
	上半部最大幅值	下半部最大幅值
1	1.26×10^{-3}	8.7×10^{-4}
2	1.12×10^{-3}	1.05×10^{-3}
3	1.28×10^{-3}	9.8×10^{-4}
4	1.17×10^{-3}	1.07×10^{-3}
5	1.06×10^{-3}	1.23×10^{-3}
平均值	1.178×10^{-3}	1.04×10^{-3}

79 gr/mm,光栅闪耀角 64°。在刻划过后对槽形进行原子力显微镜测试,结果如图 11 所示。由图可见,光栅定向面光滑平整,刻槽底角清晰,槽形挤压充分,印证了新刀架刻划工艺的可行性。

参考文献:

[1] 尹云飞,刘兆武,吉日嘎兰图,等. 二维光栅位移测量技术综述[J]. 中国光学, 2020, 13(6):1224-1238.

YIN Y F, LIU ZH W, JI R, *et al.* Overview of 2D grating displacement measurement technology [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2020, 13 (6) : 1224-1238. (in Chinese)

[2] 赵美红,李文昊,巴音贺希格,等. Offner 成像光谱仪的消像差技术[J]. 光学精密工程, 2017, 25 (12): 3001-3011.

ZHAO M H, LI W H, BAYINHEXIGE, *et al.*

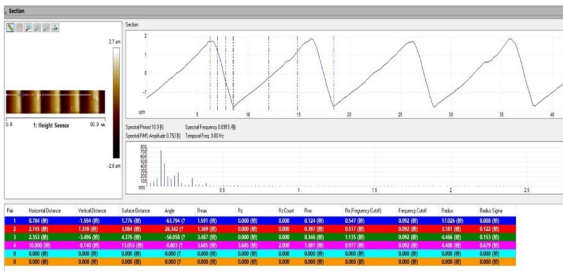


图 11 刻划光栅的原子力图像

Fig. 11 Atomic force image of ruling grating

5 结 论

为抑制光栅机械刻划过程中的颤振现象,本文对影响刀具刻划状态的柔性支撑刻划刀架机构的结构刚度进行了分析,并提出平行簧片刻划刀架以提高其颤振抑制效果。通过有限元软件对两种刀架的模式及受刻划扭矩时的形变进行仿真对比分析,可知双层平行弹簧刀架机构的一阶模态达到了 224.6 Hz,较原结构刀架提升了 2.8 倍。柔性铰链部分变形减少了 24%,刀具夹持架处减少了 36%。为量化平行簧片刻划刀架对颤振的实际抑制效果,将加速度传感器集成在刀柄上进行了刻划信号探测。结果表明,在满足实际光栅刻划工艺要求的同时,新结构振动幅值最大降低了 22.5%。说明双层平行弹簧刀架机构在光栅刻划过程中可有效降低刀具颤振幅值,提升光栅刻划质量。本文采用的颤振检测手段及刻划刀架颤振抑制优化设计方法可为高精度光栅刻划制造提供工艺手段及技术基础。

Aberration correction technique of Offner imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (12): 3001-3011. (in Chinese)

[3] 张锐,潘明忠,杨晋,等. 基于数字微镜器件的中阶梯光栅光谱仪的光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2994-3000.

ZHANG R, PAN M ZH, YANG J, *et al.* Optical system design of stepped grating spectrometer based on digital micromirror device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 2994-3000. (in Chinese)

[4] MI X T, ZHANG S W, QI X D, *et al.* Effect of the changes in refractive index of air on grating diffraction wavefront [J]. *Optics Communications*, 2020,

- 457: 124716.
- [5] GAO J, CHEN P, WU L, *et al.* A review on fabrication of blazed gratings[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(31): 313001.
 - [6] LI H, PENG X Q, GUAN C L, *et al.* Progress in the preparation and characterization of convex blazed gratings for hyper-spectral imaging spectrometer: a review[J]. *Micromachines*, 2022, 13(10): 1689.
 - [7] TOULOUSE A, DROZELLA J, THIELE S, *et al.* 3D-printed miniature spectrometer for the visible range with a $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ footprint[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, (1): 12-22.
 - [8] SHANMUGAM P, LIGHT A, TURLEY A, *et al.* Variable shearing holography with applications to phase imaging and metrology[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(2): 1.
 - [9] JIRIGALANTU, LI X T, ZHANG S W, *et al.* Ruling of echelles and gratings with a diamond tool by the torque equilibrium method[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 8082-8088.
 - [10] 唐玉国, 巴音贺希格, 竺长安, 等. 揭秘“精密机械之王”[J]. *中国基础科学*, 2018, 20(2): 48-52, 62.
TANG Y G, BAYANHESHIG, ZHU CH A, *et al.* Uncover the king of precision machinery[J]. *China Basic Science*, 2018, 20(2): 48-52, 62. (in Chinese)
 - [11] JIRIGALANTU, LI X T, MI X T. Development of a parameterized mechanical model of a chisel-edge grating ruling tool[J]. *Precision Engineering*, 2017, 50: 388-392.
 - [12] 王志学, 刘献礼, 李茂月, 等. 切削加工颤振智能监控技术[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(24): 1-23.
WANG ZH X, LIU X L, LI M Y, *et al.* Intelligent monitoring technology of cutting chatter[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(24): 1-23. (in Chinese)
 - [13] KATIYAR S, JAISWAL M, PRATAP NARAIN R, *et al.* A short review on investigation and suppression of tool chatter in turning operation[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 51: 1206-1210.
 - [14] HUANG P L, LI J F, SUN J, *et al.* Milling force vibration analysis in high-speed-milling titanium alloy using variable pitch angle mill[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58(1/2/3/4): 153-160.
 - [15] FENG J L, SUN Z L, JIANG Z H, *et al.* Identification of chatter in milling of Ti-6Al-4V titanium alloy thin-walled workpieces based on cutting force signals and surface topography[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 82(9-12): 1909-1920.
 - [16] 赵彤, 蔡晨同, 王永飞, 等. 球头铣刀铣削薄板件颤振预测[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(9): 1474-1483.
ZHAO T, CAI CH T, WANG Y F, *et al.* Flutter prediction of ball-end milling cutter milling thin plate parts[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(9): 1474-1483. (in Chinese)
 - [17] CHOCKALINGAM S, RAMABALAN S, GOVINDAN K. Chatter control and stability analysis in cantilever boring bar using FEA methods[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 33: 2577-2580.
 - [18] 石广丰, 吕杨杨, 史国权, 等. 光栅机械刻划摩擦型颤振机理[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 3061-3066.
SHI G F, LÜ Y Y, SHI G Q, *et al.* Mechanism of frictional chatter during mechanical ruling grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 3061-3066. (in Chinese)
 - [19] GAO J, SONG Q, LIU Z Q. Chatter detection and stability region acquisition in thin-walled workpiece milling based on CMWT[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(1-4): 699-713.
 - [20] 陈磊, 钟凯, 朱涛, 等. 高超声速风洞试验段环境飞行器颤振的视觉三维测量[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(8): 1811-1821.
CHEN L, ZHONG K, ZHU T, *et al.* Visual three-dimensional measurement of aircraft flutter in hypersonic wind tunnel tests[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(8): 1811-1821. (in Chinese)
 - [21] 李茂月, 刘硕, 田帅, 等. 薄壁件铣削加工颤振的图像特征提取与识别[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2022, 52(2): 425-432.
LI M Y, LIU SH, TIAN SH, *et al.* Image feature extraction and recognition of milling chatter of thin-walled parts[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2022, 52

- (2): 425-432. (in Chinese)
- [22] ALTINTAS Y, WECK M. Chatter stability of metal cutting and grinding [J]. *CIRP Annals*, 2004, 53(2): 619-642.
- [23] 魏传新, 陈洪达, 尹达一. 基于交叉簧片柔性铰链的空间微位移机构[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3168-3175.
WEI CH X, CHEN H D, YIN D Y. Spatial compliant micro-displacement magnifying mechanism based on cross-spring flexural pivot[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3168-3175. (in Chinese)
- [24] 吴昊, 李宗轩, 张德福, 等. 交叉簧片柔性铰链设计[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(10): 1203-1209.
WU H, LI Z X, ZHANG D F, *et al.* Design of cross-spring flexure hinges[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(10): 1203-1209. (in Chinese)

作者简介:



于 硕(1996—),男,吉林长春人,硕士,2018年、2021年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微纳加工技术及设备、光栅刻划技术等方面的研究。E-mail: yushuo1110@126.com

通讯作者:



吉日嘎兰图(1977—),男,内蒙古锡林郭勒人,博士,2001年、2006年于长春工业大学分别获得学士、硕士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光栅刻划刀具研发、微细加工技术及设备等方面的研究。E-mail: jiri5998@163.com