

拼接光栅五自由度并联定位机构设计

于福利, 卢礼华*, 张庆春

哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 光栅拼接技术是获得拍瓦激光系统中大口径光栅的一种有效技术途径。通过设计五自由度并联拼接机构, 采用滚珠丝杠+压电陶瓷的宏/微双重驱动技术实现毫米工作范围内纳米精度的定位。通过基于有限元法的位移耦合特性分析表明, 该机构具有较高的线性度, 位移耦合所产生的误差为纳米级, 光栅拼接的相对角度偏差小于 $0.2 \mu\text{rad}$, 位移偏差小于 20 nm。将两块 $200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的光栅安装在该拼接机构上进行实验研究, 获得了清晰的远场焦斑图像, 证明该机构可以满足大口径拼接光栅系统的精度要求。

关键词 测量; 拼接光栅; 柔性并联机构; 宏/微双重驱动; 有限元法

中图分类号 TH703

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0104005

Design of Five Degree of Freedom Parallel Locating Mechanism for Mosaic Gratings

Yu Fuli, Lu Lihua, Zhang Qingchun

School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The grating mosaic technique is an effective method to obtain the large-aperture grating of the petawatt laser system. The five degree of freedom parallel mosaic mechanism is designed. The macro/micro dual-drive technique of ball screw and piezoelectric ceramic achieves the location precision of nanometer level in the work range of millimeter level. Based on finite element method, the displacement coupling properties analysis shows that the mechanism has high linearity and the error of displacement coupling is nanometer level. The relative angle deviation of grating mosaic mechanism is less than $0.2 \mu\text{rad}$. The displacement deviation is less than 20 nm. Two gratings with size of $200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ are installed in the proposed mosaic mechanism in order to conduct experimental study. The clear image of far-field focal spot is obtained, which proves that the proposed mechanism can meet the accuracy requirement of large-aperture mosaic grating system.

Key words measurement; mosaic grating; compliant parallel mechanism; macro/micro dual-drive; finite element method

OCIS codes 120.4880; 050.2770; 220.4880

1 引 言

衍射光栅广泛应用于光谱分析、光通信、集成光学、信息处理及惯性约束核聚变(ICF)等诸多方面, 目前正朝着高效率、大面积的方向发展。研制更大尺寸的刻划机, 不但投入的资金多、周期长, 而且还要解决镀膜的均匀性和高精度自动换刀等问题^[1]。因此国内外多采用拼接技术来获取大口径光栅^[2-3]。

所谓拼接方法就是把两块或几块衍射光栅放在一起, 并使相互间衍射波阵面的相位差足够小, 相当于一块完整光栅的精度, 进而将其当作一块光栅使用^[4]。随着惯性约束核聚变研究的不断深入, 系统的功率和能量逐步提高, 为了获得拍瓦激光系统所需的高损伤阈值光栅压缩器, 迫切需要大口径、高精度的衍射光栅, 而拼接光栅是解决该问题的有效途径。与一般天文上使用的大口径拼

收稿日期: 2017-08-14; **收到修改稿日期:** 2017-09-20

作者简介: 于福利(1961—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事光学精密机械设计理论和非标光机装备制造技术方面的研究。E-mail: cxfjs@hit.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: lihual@hit.edu.cn

接光栅不同,激光系统所需的拼接光栅不但要有很高的共面精度,而且还要有很高的相位精度。拼接光栅精度的分析和检测方法有衍射波前法和远场衍射能量法等^[5-6]。拍瓦激光系统中,拼接光栅的设计偏差量对激光压缩脉冲的展宽量需控制在 25% 以内,分析得到的子光栅之间相对旋转偏差要控制在 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{rad}$ 以内^[7]。而光栅的前后、左右偏差对远场强度分布具有明显的影响^[8-9],会导致光束远场焦斑的分裂,其调整精度一般为十几个纳米。这首先要求光栅拼接机构具有足够的调整分辨率和稳定性,其二是要求实时测量拼接误差,实现对拼接误差的自动闭环调整,提高光栅拼接精度^[10]。

并联机构在机器人领域应用广泛,但是由于驱动支链和正交坐标之间存在着复杂的运动学关系,解耦运动控制比较困难。正交并联机构具有运动学关系清晰、解耦性好的优点。德国的 Noll 等^[11]将柔性正交并联机构的驱动支链正交布置成平行四边形和梯形,实现了毫米范围内六自由度的纳米和纳弧度精度的光学镜片的调整。针对大口径光栅拼

接,张军伟^[12]等设计并实现了子光栅三自由度纳米级的调整精度,并对影响光栅拼接架结构稳定性的因素进行了理论分析。

针对激光压缩器所需的大口径拼接光栅,设计了五自由度的具有毫米行程和纳米精度的正交并联柔性定位平台。基于有限元法(FEM)对关键柔性元件进行优化设计,并对柔性并联机构的运动学和动力学耦合问题进行分析。采用滚珠丝杆+压电陶瓷的宏/微双重驱动方案,实现拼接光栅的高精度位姿调整,从而满足大口径光栅拼接的实验需求和大功率激光器的实际应用需求。

2 光栅拼接系统的设计

2.1 光栅拼接机构的总体设计

由于拼接光栅是由常规光栅拼接而成,引入的空间位置偏差如图 1(a) 所示。包括二维位移偏差:左右位移偏差 Δx (光栅共面) 和前后位移偏差 Δz (光栅不共面); 三维角度偏差:俯仰偏差 $\Delta\theta_x$ 、偏摆偏差 $\Delta\theta_y$ 和条纹平行度偏差 $\Delta\theta_z$ 。这 5 个位置偏差可以看作拼接光栅的参数。

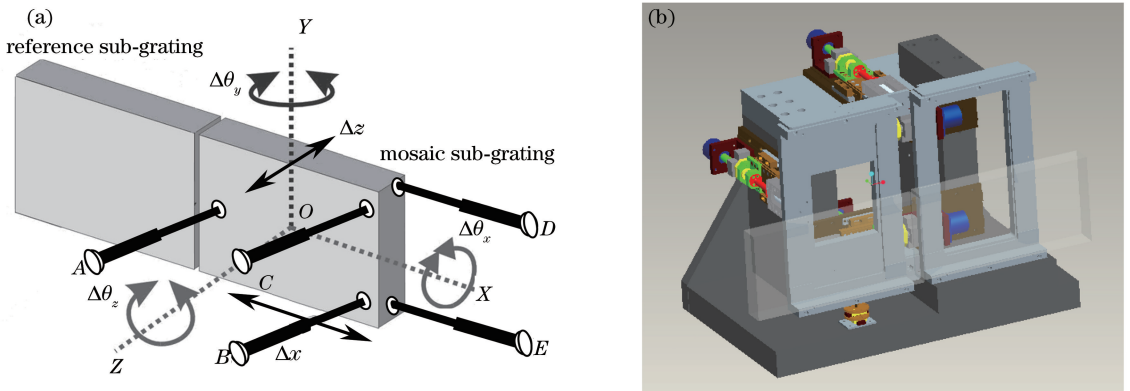


图 1 拼接光栅机构。(a)子光栅五自由度调整原理;(b)光栅拼接装置设计模型

Fig. 1 Mechanism of mosaic gratings. (a) Adjusting principle of five degrees of freedom of the sub-gratings; (b) design model of grating mosaic device

拼接光栅采用五自由度并联机构,避免了串联结构造成的误差累积,因此具有高精度、快响应和小自重负载比等优点。三个驱动轴(A、B 和 C 轴)垂直于光栅平面平行放置,两个驱动轴(D 和 E 轴)平行于光栅平面平行放置。前后位移偏差 Δz 通过驱动轴 A、B 和 C 同时输出相等的驱动量实现,由三点确定一个高精度平面。左右位移偏差 Δx 由驱动轴 D 和 E 同时输出相等的驱动量实现,此时 A、B 和 C 成为平行四边形导向机构。俯仰偏差 $\Delta\theta_x$ 由驱动轴 A、B 和 C 同时输出实现,各轴驱动量与其 Y 轴坐标成正比,由三点确定一个高精度平面。偏摆

偏差 $\Delta\theta_y$ 由驱动轴 A、B 和 C 同时输出实现,各轴驱动量与其 X 轴坐标成正比,由三点确定一个高精度平面。条纹平行度偏差 $\Delta\theta_z$ 由驱动轴 D 和 E 同时输出实现,各轴驱动量与其 Y 轴坐标成正比,此时 A、B 和 C 成为平行四边形导向机构。

光栅刻线平行于 Y 轴,在该方向上拼接光栅位置精度要求很低,不需调整。但是 Y 方向为重力方向,为了消除重力对驱动轴负载和精度的影响,采用钢球支撑,即基座上安装一个二维直线导向机构,通过钢球和球窝配合连接该导向机构和拼接光栅夹具。

为了实现两块特征尺寸为 400 mm、刻线密度 1480 mm⁻¹的平面衍射光栅的拼接,根据理论研究结果,确定光栅拼接系统的精度要求为:二维平动精度 20 nm,三维转动精度 0.2 μrad。

2.2 驱动机构的设计

光栅拼接系统需要的工作空间为毫米级,压电陶瓷无法实现如此大的行程,因此 5 个驱动轴均采用宏/微驱动方案,即滚珠丝杠+压电陶瓷,并采用柔性万向铰链将宏动机构和微动机构连接在一起。

拼接光栅的位姿调整分为宏动和微动两步,首先通过滚珠丝杠驱动使拼接光栅的位置精度位于压电驱动的调整范围内;然后通过锁紧螺钉将宏动工作台与基座锁紧。此时 5 个万向铰链和压电陶瓷驱动机构支撑拼接光栅,形成了一个高精度的五自由度柔性并联工作台。除了钢球支撑点外不存在摩擦和间隙,在压电陶瓷的驱动下,可以确保微米工作空间内纳米精度的实现。

微驱动机构采用压电陶瓷驱动平行四边形柔性铰链的结构形式,微位移机构的设计行程为 25 μm。选用德国 PI 公司压电陶瓷驱动器,运动范围为 45 μm,分辨率为 1.2 nm,刚度 75 N/μm,最大推力为 3000 N。

由于五自由度并联机构存在位移耦合现象,而柔性万向铰链是吸收位移耦合的关键零件,也是设计的关键技术之一。万向铰链结构外形如图 2 所示。

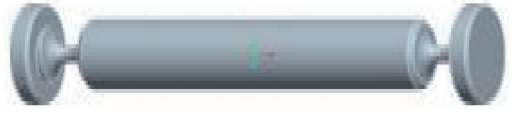


图 2 万向铰链结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of flexible ball hinge

万向铰链的轴向刚度大,弯曲刚度低,使其在轴向具有良好的动态特性和抗干扰能力,并能够充分减小并联机构各驱动轴相互作用力的干扰。在结构和材料的限制下,对柔性铰链的结构尺寸进行优化设计。有限元计算结果表明万向铰链的轴向刚度为 50.2 N/μm,横向刚度(固定铰链一端,加载使另一端产生横向平移)为 0.0425 N/μm,两者的刚度比为 1181 倍。在横向平移 0.5 mm 行程范围内,应力最大值在铰链点,且小于所采用的弹簧钢的材料弹性极限。

3 光栅拼接系统的位移耦合分析

以图 1 中的 O 点为原点,根据几何学确定 5 个轴的驱动量和拼接光栅 5 个自由度之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta z \\ \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \Delta x & \Delta x \\ \Delta z & \Delta z & \Delta z & 0 & 0 \\ A_y \cdot \Delta\theta_x & B_y \cdot \Delta\theta_x & C_y \cdot \Delta\theta_x & 0 & 0 \\ A_x \cdot \Delta\theta_y & B_x \cdot \Delta\theta_y & C_x \cdot \Delta\theta_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -D_y \cdot \Delta\theta_z & -E_y \cdot \Delta\theta_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \\ i_E \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $[\Delta_x \ \Delta_z \ \Delta\theta_x \ \Delta\theta_y \ \Delta\theta_z]^{-1}$ 是拼接光栅 5 个自由度的输出, $[i_A \ i_B \ i_C \ i_D \ i_E]^{-1}$ 代表 5 个驱动轴的单位驱动向量。 $A_x(B_x, C_x, D_x, E_x)$ 和 $A_y(B_y, C_y, D_y, E_y)$ 分别代表图 1 中驱动轴 A(B, C, D, E) 的 X 轴和 Y 轴坐标。

由于并联机构的各个轴之间存在位移耦合,(1) 式并不能完全精确地反映光栅的实际运动。例如,当驱动轴 D 和 E 同时伸长实现拼接光栅 X 方向的移动时,必然导致驱动轴 A、B 和 C 的倾斜,从而使拼接光栅在 Z 方向上产生耦合运动。如果将万向铰链简化为理想的刚性球铰链,当 X 方向的驱动量为 h 时,从几何关系可以很容易地得到 Z 方向的耦合位移 d 为:

$$d = S - \sqrt{S^2 - h^2} \approx \frac{h^2}{2S}. \quad (2)$$

其他各轴的运动都存在这种位移耦合。从运动学的角度,以上位移耦合可以通过控制系统的补偿来消除。由于拼接光栅机构并不是一个理想的刚性系统,在驱动轴 D 和 E 实现 X 方向运动时,驱动轴 A、B 和 C 变形产生的弹性回复力必然给驱动轴 D 和 E 产生附加载荷,从而使驱动轴 D 和 E 产生轴向弹性变形,导致出现定位误差。一般的刚体运动学分析和仿真无法考虑到万向铰链机构在耦合情况下产生的附加力载荷及其所导致的机构弹性变形,该部分将是拼接光栅最终误差的主要原因。为此,使用有限元法对整个系统进行运动过程静力学仿真。

假设基座及滚珠丝杠机构都是刚体,光栅及其夹具的总体外形尺寸为 430 mm×430 mm。建立拼接光栅柔性并联机构的有限元模型如图 3 所示。

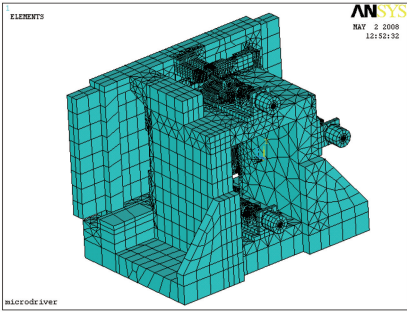


图3 光栅拼接机构的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of grating mosaic mechanism

根据(1)式,计算拼接光栅分别在 X 和 Z 方向移动 0.5 mm 和 $12.5\text{ }\mu\text{m}$ 时 5 个驱动轴的理论输入量,并将该输入施加到有限元模型上作为位移约束,进行静力学计算,得到光栅前表面节点的空间位移,通过数学处理得到拼接光栅的 5 个自由度的输出

表1 拼接光栅位移调整的有限元法计算结果

Table 1 Results of displacement adjustment of mosaic grating by FEM

Item	Macro-actuation		Micro-actuation	
	$\Delta x = 500\text{ }\mu\text{m}$	$\Delta z = 500\text{ }\mu\text{m}$	$\Delta x = 12.5\text{ }\mu\text{m}$	$\Delta z = 12.5\text{ }\mu\text{m}$
$\Delta x / \mu\text{m}$	500 ± 0.21	0.17	12.5 ± 0.005	0.005
$\Delta z / \mu\text{m}$	0.33	500 ± 0.18	0.008	12.5 ± 0.005
$\Delta\theta_x / \mu\text{rad}$	0.03	0.01	0	0
$\Delta\theta_y / \mu\text{rad}$	-3.33	0.22	0.085	0
$\Delta\theta_z / \mu\text{rad}$	0.01	-0.03	0	0

另外,光栅拼接系统的模态分析结果如图 4 所示,光栅拼接机构的第一阶自振频率为 107.6 Hz ,振型为拼接光栅沿绕 Z 轴的转动振动;第二阶自振

频率为 130 Hz ,振型为拼接光栅沿 X 方向的振动。可以看出,该机构自振频率远远高于实验室 $2 \sim 3\text{ Hz}$ 的扰动频率,具有较高的刚度和系统稳定性。

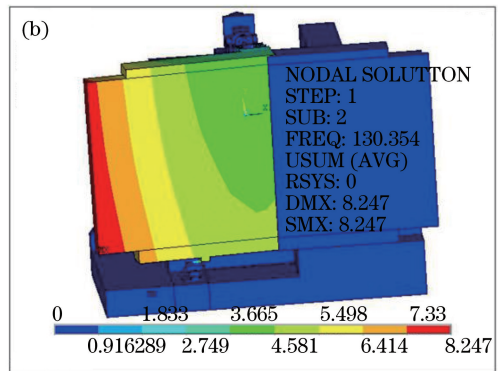
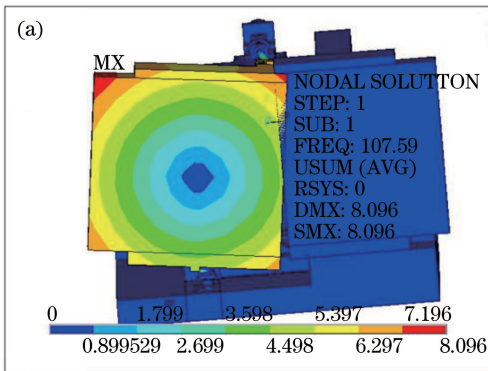


图4 光栅拼接机构模态分析结果。(a)第一阶振型;(b)第二阶振型

Fig. 4 Mode analysis results of grating mosaic mechanism.

(a) First order frequency and mode; (b) second order nature frequency and mode

4 光栅拼接实验研究

根据拼接光栅的运动学公式编写计算机控制程序,建立控制系统。在恒温、恒湿并且无噪声干扰的精密光学实验环境中,将所研制的拼接光栅装置安

装于隔振光学平台上,搭建的光栅拼接检测光路如图 5 所示。

将波长为 632.8 nm 的氦氖气体激光通过聚焦透镜 $L1$ 和 $L2$ 扩束准直为光束口径 500 mm 作为实验检测光源,透过半反镜 $M1$ 由反射镜 $M2$ 反射

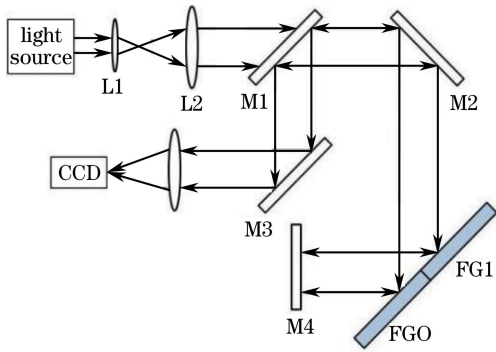


图 5 光栅拼接实验光路图

Fig. 5 Scheme of light path of grating mosaic experiment

到达静光栅 FG0 和动光栅 FG1 的交界处,光束入射角为 30° ,脉宽为 500 fs。经反射镜 M4 的反射光与光栅反射光发生干涉,干涉光经过反射镜 M2、半反镜 M1 和反射镜 M3 的作用透过聚焦透镜 L3 聚焦成像到电荷耦合器件(CCD)上,聚焦透镜焦距为 300 mm。

两块子光栅 FG0 和 FG1 的尺寸均为 $200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,刻线密度为 1480 mm^{-1} ,中心

波长为 1053 nm,工作角度为 1 级利特罗角。为了实现调整机构的双向微调能力,在系统初始化时,首先给压电陶瓷加电使其位于行程的中点,即此时压电陶瓷的行程范围为 $\pm 12.5\ \mu\text{m}$ 。在拼接光栅调整过程中,通过 CCD 检测得到的远场焦斑从分裂到重合的变化如图 6 所示。

由于各拼接子光栅的空间位置偏差会对激光脉冲产生影响。位置偏差引起的空间相位差异使聚焦后的光斑产生畸变。 Δx 包括两个部分,整数倍光栅周期的部分对远场分布没有影响,非整数倍的部分可以通过调节 Δz 来补偿。当 Δz 引起的相位差半个波长时,焦斑会分裂成对称的两部分。而角度偏差则会使得远场焦斑严重变形。图 6 所示的焦斑图像显示了焦斑从分裂到重合的过程,根据理论计算,当光栅在 Z 向的共面误差大于 20 nm 时,焦斑将分裂为图 6(a) 的形状。实验结果表明,该拼接光栅机构具有纳米精度的位姿调整能力,实现了两块光栅的完美拼接,达到了设计精度要求。

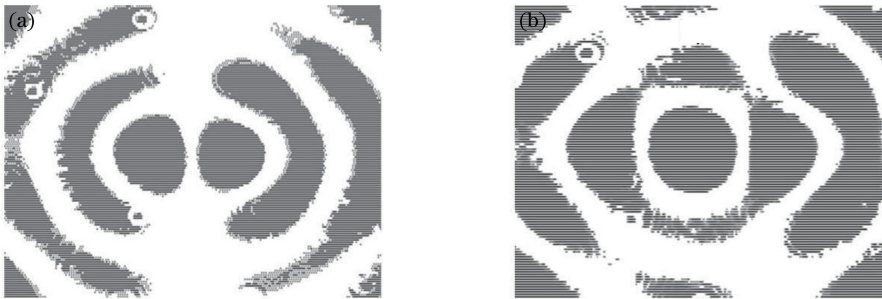


图 6 实验得到的远场焦斑图像。(a) 共面调整前;(b) 共面调整后

Fig. 6 Image of far-field focal spot by experiment. (a) Before coplanar adjustment; (b) after coplanar adjustment

5 结 论

光栅拼接技术是解决惯性约束核聚变中激光脉冲压缩器中必须具备的大面积光栅的有效途径。根据脉冲压缩器的性能要求,设计了一套用于拼接光栅的五自由度并联柔性定位系统,该系统采用滚珠丝杠和压电陶瓷的宏/微双重驱动机构,并通过优化设计的万向铰链来连接滚珠丝杠机构和压电驱动器,即可以实现较大的调整范围,又有效地减弱了并联机构的运动学和动力学耦合作用,同时将微位移阶段摩擦等非线性的影响消除到最小。有限元仿真证明该系统的 5 个自由度都具有较好的线性度。使用该光栅拼接系统对两块尺寸为 $200\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的光栅进行拼接,获得了理想的远场焦斑图像,证明该五自由度并联机构可以实现纳米精度的位置调整。

参 考 文 献

- [1] John H, Erwin L, Robert W, *et al.* A new generation of larger telescopes presents an unprecedented challenge to optics manufactures [J]. *Photonics Spectra*, 1995(12): 118-120.
- [2] Hu Y, Zeng L J, Li L F. Method to mosaic gratings that relies on analysis of far-field intensity patterns in two wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2007, 269(2): 285-290.
- [3] Wang C, Zhang J W, Du L, *et al.* Technology progress of grating tiling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 080501. 王聪, 张军伟, 杜丽, 等. 光栅拼接技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 080501.
- [4] Zhao B, Hao D F. Manufacturing large-size grating by mosaic way[J]. *Optics and Precision Engineering*,

- 2000, 8(5): 503-507.
- 赵博, 郝德阜. 用拼接法获取大面积衍射光栅[J]. 光学精密工程, 2000, 8(5): 503-507.
- [5] Lu Y X, Qi X D, Mi X T, *et al.* Detection and calculation of mosaic grating error based on wavefront method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (5): 0505001.
- 卢禹先, 齐向东, 糜小涛, 等. 基于波前法的光栅拼接误差检测及计算方法[J]. 光学学报, 2016, 36 (5): 0505001.
- [6] Lu Y X, Qi X D, Yu H L, *et al.* Precision analysis of grating replicated mosaic error based on the principle of Fraunhofer[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(5): 0508005.
- 卢禹先, 齐向东, 于海利, 等. 基于夫琅禾费原理的光栅复制拼接误差精度分析[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508005.
- [7] Xia L, Yang X D, Xu G, *et al.* Tiled-grating rotation detecting technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0308001.
- 夏兰, 杨学东, 徐光, 等. 光栅拼接旋转误差检测系统[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308001.
- [8] Kessler T J, Bunkenburg J, Huang H, *et al.* Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[J]. *Optics letters*, 2004, 29(6): 635-637.
- [9] Ma X M, Dai Y P, Zhu J Q. Effect of tiling gratings errors on laser beam spatial distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(2): 161-165.
- 马雪梅, 戴亚平, 朱健强. 拼接光栅的偏差对光栅空间特性的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 161-165.
- [10] Wang C, Du L, Zhang J W, *et al.* Advancing precision of grating tiling with modified single neuron adaptive PID control algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0502014.
- 王聪, 杜丽, 张军伟, 等. 采用改进的单神经元 PID 控制算法提高光栅拼接精度的方法[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502014.
- [11] Noll T, Holldack K, Reichardt G, *et al.* Parallel kinematics for nanoscale Cartesian motions [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(3): 291-304.
- [12] Zhang J W, Chen W, Zhou Y, *et al.* Design and demonstration of high stability array tiled grating frame[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0216001.
- 张军伟, 陈伟, 周忆, 等. 高稳定性阵列光栅拼接架设计与验证[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0216001.