

高稳定性阵列光栅拼接架设计与验证

张军伟^{1,2} 陈伟¹ 周忆¹ 陈良明² 王逍² 周海² 林东晖²

(¹重庆大学机械工程学院, 重庆 400044
²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 光栅拼接是解决光栅口径限制的一种有效途径,而光栅拼接的难点是子光栅的精密调整和稳定性保持。为实现子光栅的精密调整,采用了差动螺纹和压电驱动器两级驱动调整机构,子光栅调整精度可达纳米量级;为提高光栅拼接架结构稳定性,对影响光栅拼接架结构稳定性的因素进行了理论分析,根据分析结果,设计了新型的光栅拼接架,采用整体式支撑结构以提高光栅拼接架的固有频率,用柔性铰链代替弹簧以提高子光栅与光栅支撑架的联接刚度,光栅拼接架的稳定性得到大幅提高。经实验测试,拼接架的稳定时间超过 1 h,子光栅间相对位移标准差为 35.7 nm,拼接架满足使用要求。

关键词 光学设计;光栅拼接;拼接架;结构设计;稳定性

中图分类号 O436.1; TN203 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0216001

Design and Demonstration of High Stability Array Tiled Grating Frame

Zhang Junwei^{1,2} Chen Wei¹ Zhou Yi¹ Chen Liangming² Wang Xiao²

Zhou Hai² Lin Donghui²

(¹College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Tiled grating is one of effective the ways to solve the problem of grating aperture limit and the difficulties of tiled grating are the adjustment of sub-aperture grating and stability. Two classes of macro and micro drive modes are adopted to achieve the precision adjustment of sub-aperture gratings. A new tiled grating frame is designed to increase the stability of tiled grating frame. In the tiled grating frame, an integrated support structure is adopted to increase the natural frequency of the tiled grating, and flexible hinges are adopted instead of springs to increase the joint stiffness between the sub-aperture grating and the support frame. The experiment indicates that the tiled grating can keep in stability for more than one hour and the relative displacement standard deviation is 35.7 nm between sub-aperture gratings, which can satisfy the design requirement.

Key words optical design; tiled grating; tiled grating frame; structure design; stability

OCIS codes 220.4830; 220.4880; 220.1140

1 引言

近年来由于啁啾脉冲放大(CPA)技术的应用,使得获得更高能量、更高强度的超短脉冲成为可能。这给很多领域的研究工作提供了有力的工具,如光与物质相互作用、惯性约束聚变中的快点火实验研究等。

高能短脉冲激光能量受限于压缩光栅的口径和损伤阈值^[1]。传统镀金光栅制作工艺成熟,口径可

以做得较大,但损伤阈值很低^[2]。多层介质膜光栅损伤阈值远高于镀金光栅,但是制作工艺复杂,目前能制作的最大的光栅尺寸在米量级^[3]。在现阶段光栅损伤阈值不能大幅提高的情况下,增大光栅口径是提高高能短脉冲激光能量的主要技术途径之一。日本的 FIREX-I^[4],美国的 OMEGA-EP 都采用了光栅拼接的方法以解决光栅口径限制的难题^[5]。自光栅拼接概念提出以来,很多学者对此进行了研

收稿日期: 2011-09-05; 收到修改稿日期: 2011-10-14

基金项目: 国家高技术发展计划资助课题。

作者简介: 张军伟(1981—),男,博士,讲师,主要从事机电系统分析方面的研究。E-mail: zjw425@163.com

究^[6~9]和实验验证,研究发现,由于光栅拼接各个自由度方向的拼接误差在纳米量级,光栅拼接稳定性变得难以控制,但随着光栅拼接口径的增大、子口径光栅的增多,光栅拼接稳定性是必须解决的问题。尽管国内外学者针对光栅拼接误差控制方式提出了配对补偿^[10]、光栅自拼接^[11]等多种方法,这些方法在降低光栅拼接调整维数上有一定的作用,但对光栅的稳定性控制反而提出了更高的要求。目前 OMEGA-EP 装置上实现了 3 块光栅拼接,拼接后的光栅口径为 1.41 m×0.43 m; FIREX- I 实现了 2×1 大口径光栅拼接^[12]。由于国内目前还不能加工米量级的光栅,而进口光栅存在诸多限制,获得大口径的光栅只能采用多块拼接的方式。针对现状,本文提出了阵列拼接的方式获得大口径光栅,设计了 2×2 光栅拼接架,并对方案进行了验证。

2 阵列光栅拼接设计思路

光栅拼接架设计需满足 3 个基本功能要求,其一是光栅对之间的整体调整及子光栅之间的调整;

其二是子光栅的调整精度要求(光栅架整体调整精度较低,比较容易满足);其三是光栅拼接架的稳定性控制。子光栅相互之间要实现 5 自由度调整才能满足光栅拼接要求^[13],其相互调整自由度如图 1 所示。

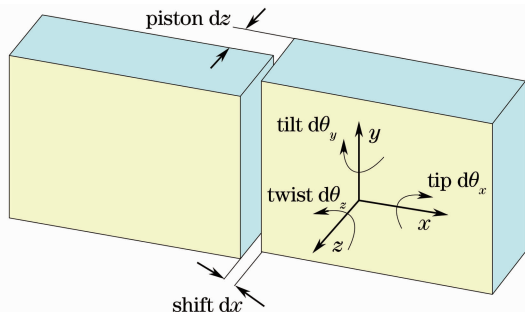


图 1 拼接光栅的误差种类示意图

Fig. 1 Five degrees of freedom between the two adjacent diffraction gratings ($\theta_x, \theta_y, \theta_z, x, z$)

根据光栅拼接架及结构稳定性控制研究经验,阵列光栅拼接光栅架要实现良好的工作性能,应采用如图 2 所示系统构成。

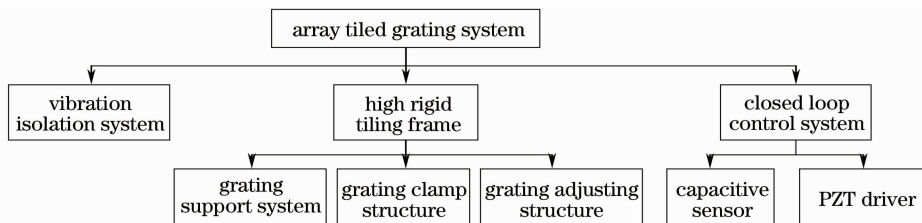


图 2 光栅拼接系统构成

Fig. 2 Structure of tiled grating system

环境振动隔离系统可以把外部主要振源隔离,包括暖通空调引起的振动、真空机组局部诱导振动等,对振源进行隔离可以降低光栅拼接架结构稳定性实现难度。高刚性拼接架主要由光栅支撑结构、夹持机构、光栅调整机构组成,其中光栅支撑结构是光栅拼接架保持稳定的基础。光栅调整机构是光栅拼接的核心,保证子光栅满足配对补偿理论要求的精度,并保持稳定是光栅调整机构的重点。闭环控制系统主要由电容传感器和压电陶瓷(PZT)驱动器构成,其作用是通过电容传感器检测光栅拼接误差,通过压电驱动器对拼接误差进行有效控制。本文仅对光栅拼接架的设计进行介绍。

3 光栅拼接架结构设计

3.1 理论基础

影响光栅拼接稳定性的主要因素是环境振动和热载荷,环境振动主要影响光栅的空间稳定性,表现

为远场焦斑的不断整合、分裂,热载荷主要影响光栅的时间稳定性,表现为远场焦斑的逐渐分裂。空间稳定性主要靠结构设计来实现,时间稳定性通过闭环控制来实现。影响光栅拼接环境振动的因素包括地脉动、空调机组振动和真空机组诱导振动。这些激励因素具有一定的特征频率,但广义上表现为随机振动,在随机振动的激励下,把子光栅简化为单自由度模型,简化模型如图 3 所示,包含质量块 M ,刚

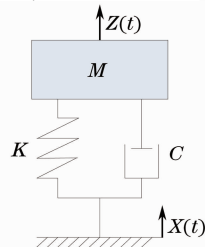


图 3 光学元件与支撑结构简化模型

Fig. 3 Simplification model of optical elements and support structure

度 K 和阻尼 C 。其中光栅简化为质量块 M , 子光栅支撑架简化为模型的刚度 K , 拼接架材料阻尼及连接阻尼简化为阻尼 C 。

在图 3 中 $X(t)$ 为地面振动位移, 光学元件的运动位移为 $Z(t)$, 光学元件的振动方程可以表示为

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2y = -\ddot{x}(t), \quad (1)$$

式中 $y = Z(t) - X(t)$; $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 为固有频率;

$$\xi = \frac{c}{2\omega_n m} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$
 为阻尼比。

假设镜架在随机振动激励下, 激励谱为 S_0 , 根据虚拟激励法可得子光栅在随机振动激励下的动态响应,

$$\varphi_y^2 = \frac{S_0}{4\xi(2\pi f_n)^3}, \quad (2)$$

式中 S_0 是环境振动功率谱; φ_y 为系统响应; f_n 为系统固有频率。

从(2)式中可以看出, 影响光栅拼接架空间稳定性的主要因素包括激励功率谱、系统固有频率和阻尼比。激励功率谱与外部环境有关, 对激励功率谱进行控制不仅技术难度大, 成本也会非常高。降低拼接架动态响应的主要措施是提高系统固有频率和阻尼比。

光栅拼接架设计的核心是实现子光栅的调整和光栅拼接架稳定性的保持, 其中光栅拼接架稳定性保持是光栅拼接架设计的核心。从上面的分析可知, 提

高拼接架稳定性的可行措施是提高系统固有频率。

光栅拼接架结构上包含三大部分, 分别是光栅支撑结构、子光栅夹持机构和子光栅调整机构, 这三部分是串联关系, 系统的固有频率由这三者之间的薄弱环节决定。子光栅的夹持机构可以对子光栅实现多点夹持, 可近似为刚体, 因此提高光栅拼接架固有频率应提高光栅支撑结构的固有频率和提高子光栅调整机构的刚性。

3.2 总体结构设计

子光栅实际上是一个薄板结构, 多个子光栅拼接构成了一个薄板系统, 由于光栅拼接采用的光栅是反射式光栅, 子光栅的支撑只能在光栅的背面。如果这些光栅只有 1 块支撑板进行支撑, 由薄板受力理论分析(薄板的抗弯能力与其厚度的 3 次方成正比)可知, 这种结构的抗弯能力较差, 即子光栅会产生较大的俯仰变形[图 4(a)中绕 x 轴], 从而造成整个光栅拼接架固有频率偏低, 不利于稳定性的保持。为改变这种情况, 本文把光栅支撑板由 1 块变为 2 块, 适当增加 2 块支撑板之间的距离, 通过连接杆把两支撑板连接成一个整体, 这样增大了光栅支撑结构的厚度, 大幅度提高了拼接架的抗弯能力, 提高了光栅拼接支撑结构的固有频率。

本文设计的阵列光栅拼接架整体式支撑结构如图 4 所示, 4 块子光栅由 2 块支撑板进行支撑。

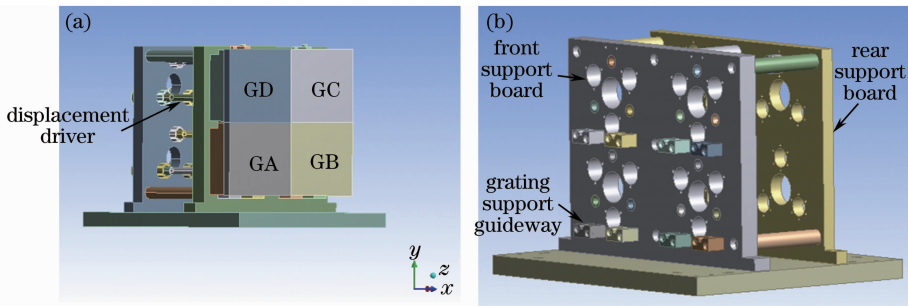


图 4 阵列光栅拼接结构。(a) 总体结构; (b) 支撑结构

Fig. 4 Structure of array tiled grating. (a) Total structure; (b) support structure

阵列光栅拼接架主要由支撑结构、子光栅夹持结构及驱动机构组成。支撑结构如图 4(b)所示, 由前后支撑板通过连接机构连接, 构成一个整体支撑系统。采用前后板支撑结构不仅可以增大支撑结构 z 向尺寸以增加结构稳定性, 而且方便驱动器的固定(驱动器较长, 需要在尾部固定)。子光栅由滑动导轨支撑, 子光栅重量落在支撑导轨上。每个子光栅与 3 个驱动器相连以实现子光栅的调整。

3.3 子光栅调整结构设计

根据光栅拼接的要求, 两子光栅要实现一块光栅的作用, 其 5 个自由度方向的拼接误差(图 1)都要控制在要求的误差范围内。光栅拼接配对补偿理论^[14~16]证明在一定的误差范围内, 光栅缝宽 shift(dx)和前后错位误差 piston(dz)可以相互补偿, 绕 x 轴旋转误差 tip($d\theta_x$)和绕 z 轴误差 twist($d\theta_z$)可以相互补偿, 光栅线密度误差(Δd)和绕 y 轴旋转误

差 tilt($d\theta_y$)可以相互补偿,这样就可以在子光栅的拼接误差调整设计中把5维降成三维,即子光栅只要能够对 piston、tip 和 tilt 进行精确调整即可以满足子光栅的使用要求。

在传统的结构设计中,实现3个自由度(piston、tip 和 tilt)调整需要设计3个机构,分别调整 piston、tip 和 tilt,即采用串联的调整方式。串联的调整方式可以避免各自由度之间的联动,实现各自由度的精确调整,但串联调整传动链过长,容易造成误差累积,同

时结构稳定性较差。为提高光栅拼接架结构稳定性,本文对这3个自由度的调整采用并联机构实现,即通过3个驱动机构并行驱动实现子光栅的调整,由于子光栅由3个驱动器同时固定,并联机构的稳定性较串联机构得到大幅提升。由于并联机构可能带来各自由度调整的联动,为减小联动的影响,各自由度调整值由传感器进行监测,并通过压电驱动器进行补偿。子光栅的调整方式如图5所示。

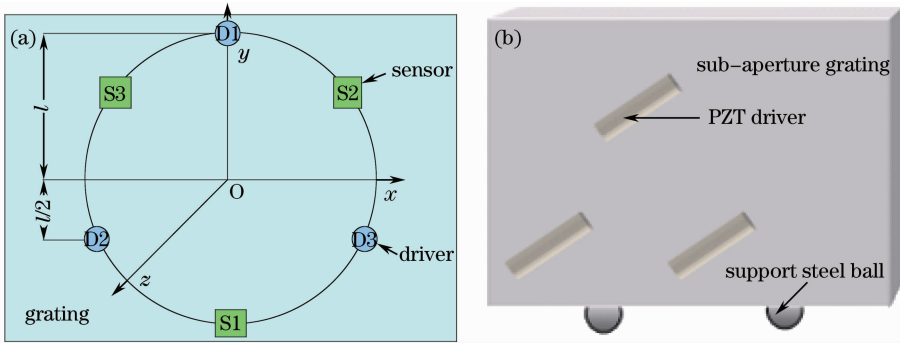


图5 子光栅调整方式。(a)传感器及驱动器布置图;(b)子光栅模型示意图

Fig. 5 Sub-aperture grating adjustment mode. (a) Allocation of sensors and drivers; (b) sketch map of sub-aperture grating model

每个子光栅由3个压电驱动器进行调整,每个压电传感器运动的距离对应1个电容传感器进行检测。3个压电驱动器分布在圆周上,每个驱动器之间的间隔为 120° 。压电驱动器与电容传感器关于圆心对称,这样电容传感器可以准确检测到驱动器运动的距离,实现子光栅3个自由度方向拼接误差的调整,调整过程为压电驱动器 D1、D2、D3 同时运动可以实现 piston 误差的调整;压电驱动器 D1 和 D2、D3 同时反向运动实现 tip 误差的调整;D1 不动, D2、D3 同时反向运动实现 tilt 误差的调整。

子光栅由镜框夹持,镜框通过柔性铰链与压电驱动器进行连接(如图6所示),子光栅镜框下面通过钢球支撑在图4(b)中导轨上,避免压电驱动器承受剪切力。本文阵列光栅压电驱动器选用PI的产品,压电驱动器尾部与光栅架后支撑板通过差动螺纹连接(图6),由于压电驱动器调整范围有限,差动螺栓可以实现子光栅的粗调。图6中的差动螺纹实际上由两层螺纹构成,外面一层是导程为1.5 mm的M24螺纹,外面一层螺纹的螺杆是内层螺纹的螺母,该螺母螺纹的导程为1 mm,内螺杆与驱动器相连,内螺杆被销钉限制转动,仅能做直线运动。在旋转外螺杆时,螺杆向左移动,内螺杆相对外螺杆向右移动,由于内外螺纹导程相差0.5 mm,外螺杆旋转

一周内螺杆实际向左移动0.5 mm,这样通过旋转外螺杆可以实现驱动器的微量进给,实现光栅的粗调(相对于压电驱动器的纳米级进给)。驱动器通过柔性铰链与光栅夹持框相连。图7为使用的两自由度柔性铰链,铰链两端分别与驱动器和光栅的夹持框通过螺钉直接联接。柔性铰链通过自身的变形实现连接件的相对运动,并且柔性铰链仅能实现特定方向的变形,在其他方向上刚度较大,便于稳定性的保持。图7中的柔性铰链可以在图示两个自由度方向弯曲,可以实现子光栅 tip 和 tilt 误差的调整。该柔性铰链可以增强子光栅与驱动器之间的连接刚度,并能实现特定自由度方向的转动。

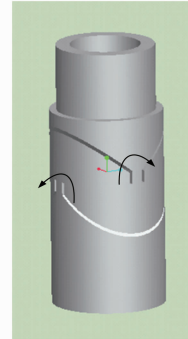


图6 连接子光栅和支撑架的柔性铰链

Fig. 6 Flexible joint between sub-aperture grating and support frame

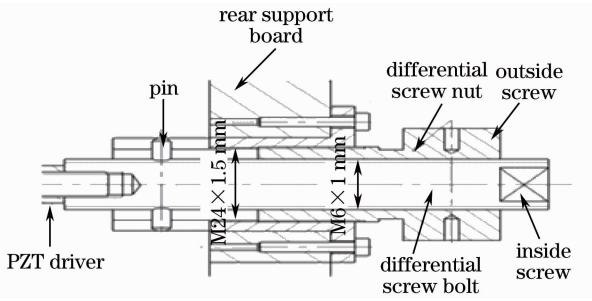


图7 驱动器连接螺栓
Fig. 7 Driver joint bolt

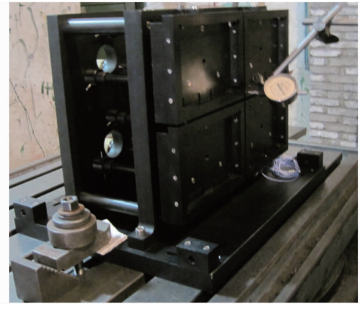


图8 测试平台
Fig. 8 Test platform

3.4 光栅安装精度检测

由于配对补偿在一定的精度范围内才能得到应用,因此光栅拼接架的安装精度尤其重要。拼接架的安装精度通过调整差动螺栓来实现,安装精度的测试通过千分表来实现。拼接架整体精度测试在坐标镗床上进行,如图8所示,使用压板把光栅拼接架固定在镗床工作台上,千分表通过磁性表座固定在镗床工作台上,千分表测头在子光栅框外表面滑动,从而测出子光栅框的安装平面度。本次测试选择了16个关键位置进行测量,测点分布如图9所示。设定1点为基点,测试结果如表1所示。

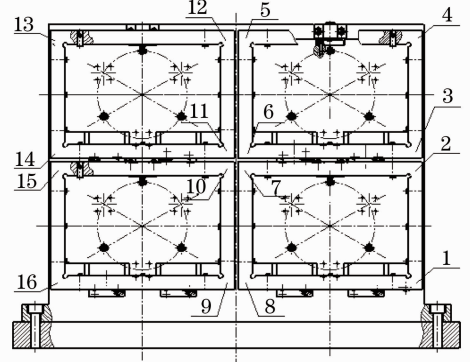


图9 测点布置
Fig. 9 Test points allocation

表1 测点结果

Table 1 Precision of test points

Test point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Error / μm	0	-5	+2	+6	-8	-14	+3	-7	+3	+27	-12	+2	-5	-9	-12	0

测试结果表明4个子光栅拼接后平面误差基本在0.01 mm以内,小于拼接误差配对补偿使用要求。

4 光栅拼接架稳定性测试结果

光栅拼接是否达到要求,最直观的测试方法是利用光束通过光栅后的远场图像进行判断。如果子光栅之间不存在角度误差和相位误差,经过透镜聚焦后会呈一个完整的焦斑,如果子光栅之间存在相位差,焦斑呈分裂状态,如图10所示,并且对于不同

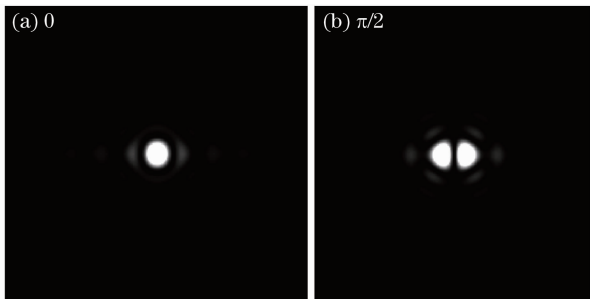


图10 不同相位差焦斑图像

Fig. 10 Focus spot image of different phase differences

的相位差,焦斑的形状是不一样的。利用光斑的不同形态(主次峰比)来判断前后错位误差。

为测试光栅拼接架的稳定性情况,在空调正常运行的情况下,采用CCD对远场图像进行了长达1 h的监测,监测结果如图11所示。

从测试结果来看,在1 h的监测过程中,焦斑没有出现分裂,这说明阵列镜架具有良好的稳定性。

为分析前后错位误差变化,采用高帧频CCD采集了60 s图像,采集频率为50 Hz(由于图像格式数据量较大,没有把1 h的图像全部存储下来),共采集3000幅图像。经过处理,两子光栅相对位移标准差为35.7 nm。图12中,根据图像分析得到的Piston误差并不是在“零”位置随机波动,这与子光栅之间初始调整位置有关,对分析光栅拼接架稳定性没有影响。

5 结论

光栅拼接是获得大口径光栅的有效途径之一。由于国内目前还不能加工口径超过500 mm ×

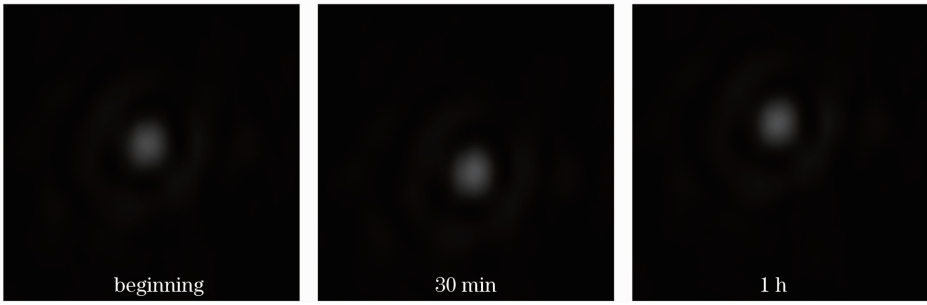


图 11 长时间监测焦斑形态

Fig. 11 Different shapes of focus spot within 1 h

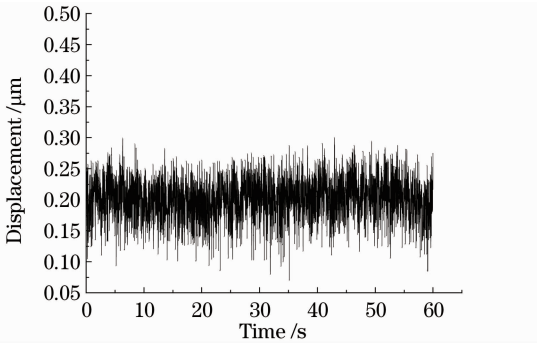


图 12 前后错位误差变化

Fig. 12 Piston changing with time

500 mm的大口径光栅,面对拍瓦装置的建设,采用多块光栅拼接以提高单束光路激光能量是必然选择。基于此,本文提出了光栅的阵列化拼接,并且针对光栅拼接中的稳定性控制难题,设计了新型的光栅拼接架,从对光栅拼接架从结构上进行了优化设计,以提高光栅拼接稳定性。具体措施包括:采用整体式支撑结构以提高光栅拼接架的固有频率,采用差动螺纹+压电驱动器的驱动方式实现子光栅调整的宏微调节驱动,用柔性铰链代替弹簧连接以提高联接刚度。对光栅拼接架的整体装配进行了控制,平面内最大测点误差为 $27 \mu\text{m}$,该精度满足光栅配对补偿理论的要求。采用远场检测的方式,对拼接架的稳定性进行了检测,证明拼接架子光栅 piston 标准差为 35.7 nm ,完全满足设计要求。

参 考 文 献

- 1 Xia Lan, Yang Xuedong, Xu Guang *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
- 2 Ma Xuemei, Dai Yaping, Zhu Jianqiang. 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束空间特性的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(2): 161~165
- 3 T. Jitsuno, S. Motokoshi, T. Okamoto *et al.*. Development of

- 91 cm Size Gratings and Mirrors for LEFX Laser System[J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2008, **112**(3): 032002
- 4 N. Miyanaga, H. Azechi, T. Jitsuno *et al.*. Development of 10-kJ PW laser for the FIREX-I program [C]. *Inertial Fusion Sciences and Applications*, 2006. 267~275
- 5 J. Qiao, A. Kalb, T. Nguyen *et al.*. Demonstration of large-aperture tiled-grating compressors for high-energy, petawatt-class, chirped-pulse amplification systems[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(15): 1684~1686
- 6 J. Qiao, A. Kalb, M. J. Guardalben *et al.*. Large-aperture grating tiling by interferometry for petawatt chirped-pulse-amplification systems [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9562~9573
- 7 T. J. Kessler, J. Bunkenburg, H. Huang *et al.*. Demonstration of coherent addition of multiple gratings for high-energy chirped-pulse-amplified lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 635~637
- 8 Xiao Wang, Qihua Zhu, Yanlei Zuo *et al.*. Matched wavelength and incident angle for the diagnostic beam to achieve coherent grating tiling[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 241~243
- 9 Arnaud Cotel, Caroline Crotti, Patrick Audebert *et al.*. Tiled-grating compression of multiterawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1749~1751
- 10 Yanlei Zuo, Xiaofeng Wei, Xiao Wang *et al.*. Eliminating the longitudinal piston error between tiled gratings by angle tuning [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 280~281
- 11 Zhaoyang Li, Guang Xu, Tao Wang *et al.*. Object-image-grating self-tiling to achieve and maintain stable, near-ideal tiled grating conditions[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(13): 2206~2208
- 12 Y. Ezaki, M. Tabata, M. Kihara *et al.*. Development of a Segmented Grating Mount System for FIREX-I[C]. *IFSA*, 2007. 1~4
- 13 Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Far field analysis after chirped pulse passing through a misalignment tiled grating compressor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 922~927
左言磊, 魏晓峰, 朱启华 等. 啁啾脉冲通过失调拼接光栅压缩池后的远场分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 922~927
- 14 Yang Xuedong, Xia Lan, Ma Weixin *et al.*. Experiment of real time monitoring and adjusting of rotation error about tiled gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1222~1226
杨学东, 夏 兰, 马伟新 等. 光栅拼接旋转偏差实时监测调节实验[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1222~1226
- 15 Zuo Yanlei, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Design of an arrayed grating compressor based on far field[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(10): 1619~1624
左言磊, 魏晓峰, 朱启华 等. 基于远场的拼接光栅压缩池的设计[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(10): 1619~1624
- 16 A. Cotel, M. Castaing, P. Pichon *et al.*. Phased-array grating compression for high energy chirped pulse amplification lasers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(5): 2742~2752