

激光系统中可调节支撑镜架的结构稳定性研究

张朝^{1,2,3}, 汤更秀^{1,2}, 刘志刚^{1,2}, 庞向阳^{1,2}, 张臻^{1,2}, 朱健强^{1,2*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 激光器输出功率稳定及高功率激光装置中长光程传输光束指向稳定,都对维持光学件位置的支撑镜架稳定性提出了很高的要求。为了维持光束的准直性,支撑结构必须兼顾可调节性和稳定性,而可调节性将引入不稳定性。本文针对可调节支撑镜架中常用的调节结构提出一种结构改进设计,通过添加单独起导向作用的精密滑动配合,实现对传统调节结构中导向与传动耦合的螺纹配合进行功能解耦,降低了螺纹配合中较大径向间隙对导向精度的影响,提高了镜架的稳定性;搭建了稳定性对比测试装置,实现在同一光路中对不同光学镜架的稳定性对比测试。实验结果验证了所提改进调节结构可有效提升光学支撑镜架结构的稳定性。

关键词 光学器件; 光学调节结构; 可调节支撑镜架; 角漂移; 稳定性

中图分类号 TN243

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1001002

Structural Stability of Adjustable Support Mirror Mount in Laser System

Zhang Chao^{1,2,3}, Tang Gengxiu^{1,2}, Liu Zhigang^{1,2}, Pang Xiangyang^{1,2},
Zhang Zhen^{1,2}, Zhu Jianqiang^{1,2*}

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²National Laboratory on High Power Laser and Physics, Chinese Academy of Engineering Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The stability of laser output power and beam pointing stability of the long optical path transmission in high-power laser devices have strict requirements, which puts high requirements on the stability of support mirror mount to maintain the position of the optical components. In order to maintain the beam collimation, the support structure must take into account both adjustability and structure stability, whereas adjustability will introduce instability. This paper proposed a structural improvement design for the commonly used adjustment structure in adjustable support mirror mount. By adding a precise sliding fit which plays a guiding role alone, the function decoupling of the thread matching of the guide and transmission coupling in the traditional adjusting structure is realized, which reduces the influence of large radial clearance on the guiding accuracy in the screw fit, improves the stability of the mirror mount, and builds a stability comparison test device. This device can be used to test the stability of different optical mirror mounts in the same optical path. Experimental results show that the improved adjustment structure could improve the stability of the overall support mount.

Key words optical devices; optical adjustment structure; adjustable support mirror mount; angle shift; stability

OCIS codes 220.4880; 140.3425; 120.4880; 120.6810

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-04-17; 录用日期: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(61827816, 11875308, 61675215)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20180024)、上海市“科技创新行动计划”项目(19142202600)、中以超短脉冲激光等离子体物理联合研究项目(19560713700)

* E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn

1 引言

随着激光技术的发展,激光器已普遍应用于材料加工、医疗、军事及科研等领域^[1-2]。为了保证激光器高稳定的输出功率、确保光束质量以及光束指向性稳定,谐振腔内部的光学支撑结构要求具有优异的稳定性^[3]。而光束指向性的实现,不仅要求镜架具有一定的调节功能,又要具有良好的稳定性。相比于固定支撑镜架,可调节支撑镜架在提高调节自由度的同时,将不可避免地引入结构不稳定性,导致光轴不稳定。因此,研究可调节支撑镜架的稳定性具有十分重要的意义。

为了实现精确打靶物理实验,惯性约束聚变(ICF)实验的高功率激光装置对光束指向稳定性提出严格的要求^[4]。系统中光学元件数量多,传输距离长,最终光束精度要求达到几微米以内^[5]。高功率激光装置也要求可调节光学支撑平台具有极高的稳定性。

研究者普遍认为调节机构是影响支撑镜架稳定性的重要因素,并从材料和镜架的结构设计两方面进行了广泛的研究。材料方面主要从材料的尺寸不稳定性^[6-7]和材料间的热匹配^[8-10]等方面进行研究,结构上则从光学件的无应力安装^[11]、调节结构的改进设计^[12]及其锁紧机构的设计^[13]等方面进行高稳定性的结构设计研究。此外,研究者也针对支撑镜架的稳定性测量方法进行了研究,常用的方法为采用自准直仪^[14-15]直接对准测试镜架或采用激光器和CCD搭建测试光路^[16-17],通过观察施加热冲击下的测试镜架所引起的光斑随时间的漂移量来评估镜架的稳定性。现有支撑镜架稳定性的测试方法主要针对单个光学支撑镜架展开,针对不同镜架结构的稳定性对比,则需要分别进行测量后才能进行对比,不同时间段下的环境微变化不可避免地引入对比误差。

本文从可调节支撑镜架的调节机构所引入的不稳定性出发,针对激光系统中常用的光学调整架^[18]和其他类型的支撑结构中常用的微调丝杆结构进行了结构改进设计^[19]。相比于常用的微调丝杆结构,该改进结构在不增加锁紧机制的情况下,对微调丝杆结构驱动机制进行结构改进设计,解决了螺纹配合中存在的径向间隙所导致的漂移,在确保调节精度的同时提高了支撑镜架的稳定性。同时,提出一种可在同一实验光路中直接对比两种不同镜架稳定性的测试方法,并结合实验验证了改进微调丝杆结构对提升可

调节支撑镜架稳定性的有效性。

2 结构设计

可调节支撑镜架结构根据组成功能可分解为固定组件、移动组件、调节组件和预紧组件,如图1所示。调节组件和预紧组件将固定组件与移动组件连接,其中调节组件起驱动作用,预紧组件起约束作用,使移动组件始终抵靠在调节组件上。通过驱动调节组件便可实现对移动组件的方位调节,进而实现对安装在移动组件上的光学件的精密调节。相比于不可调的固定支撑镜架,可调节支撑镜架引入了存在相对运动的调节组件,导致镜架稳定性下降。因此,调节组件是可调节支撑镜架结构稳定性的重要影响因素。

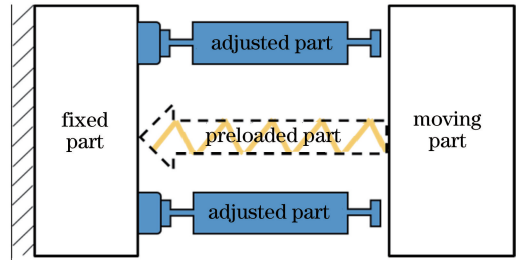


图1 可调节光学支撑结构的功能拆解图

Fig. 1 Functional disassembly diagram of adjustable optical support structure

图2(a)显示了一种光学调整架结构的爆炸图,光学调整架为激光系统中常用的可调节支撑镜架,由固定组件(基板)、移动组件(前板)、调节组件(微调丝杆结构)和预紧组件(弹簧)组成。调节组件由两个具有球形尖端的微调丝杆结构和一个钢珠组成,分别与前板上的圆锥面、V型面和平面进行点接触,约束前板的6个自由度,实现完全自由度约束。为了保证移动组件(前板)始终与微调丝杆结构和钢球接触,结构中采用两个或多个张紧的线弹簧作为预紧组件,将移动组件(前板)始终拉向固定组件(基板)。通过驱动不同位置处的微调丝杆结构便可对安装在前板的光学件进行偏航(yaw)和俯仰(pitch)的调节,同时微调丝杆结构还起着维持光学件位置的作用。微调丝杆结构驱动精度和稳定性直接决定着光学件方位的调节精度和位置稳定性。

图2(b)为光学调整架及其他光学支撑平台中常用的微调丝杆结构剖视图,该结构通过螺纹配合实现丝杆的驱动和导向。为了确保驱动的平滑,常常会在螺纹表面涂抹适量的润滑脂。在预紧弹簧的作用下,螺纹配合中的螺齿面产生单向接触,将配合

间隙中的润滑脂挤压到径向和轴向螺齿面非受压侧。在环境温度变化下,润滑脂产生缓慢的蠕动,导致丝杆相对螺母产生微小的位移,该现象是引入微调丝杆结构不稳定性的的重要原因。

实际螺纹配合中总存在一定的径向间隙,以及螺母内圆面轮廓加工误差和螺纹配合长度加工误差等引入的配合误差,使得一般的螺纹配合径向间隙可达到几十微米甚至上百微米,在预紧力

和重力作用下,这种径向间隙导致丝杆相对螺母总存在微小的倾角,如图 2(c)的局部放大图所示。在温度变化的环境中,分布在螺纹配合面间的润滑脂会发生缓慢的蠕动。而润滑脂的蠕动使得丝杆相对螺母轴的倾斜状态发生改变,最终导致光学件产生微小的漂移。对于应用在激光系统中的光学件,微小的倾斜经过长光程传播后也会产生较大的漂移。

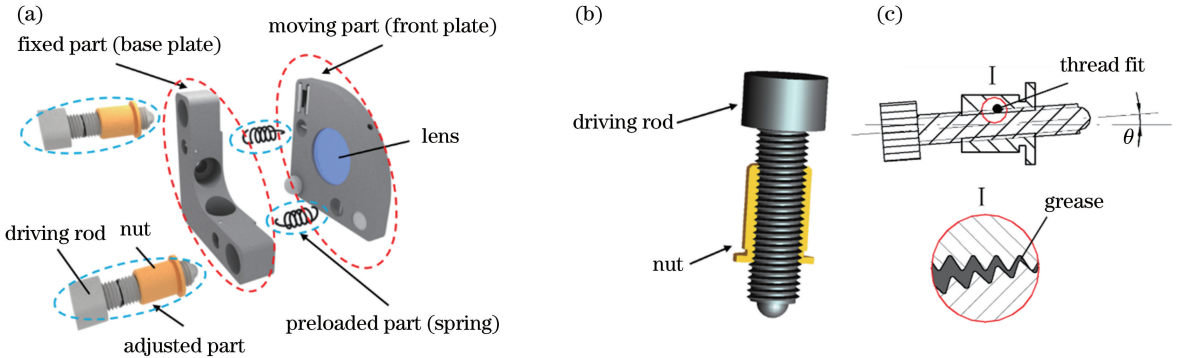


图 2 光学调整架爆炸图及所安装的微调丝杆结构。(a)光学调整架爆炸图;(b)微调丝杆结构剖视图;(c)微调丝杆结构二维剖面图

Fig. 2 Explosion diagram of kinematic optical mount and structure of installed adjustment screw. (a) Explosion diagram of the mount; (b) section view of adjustment screw; (c) 2D section view of adjustment screw

针对微调丝杆结构中存在的径向漂移,Zhu等^[19]提出一种改进的微调丝杆结构,如图 3(a)所示。该结构主要由把手、螺母、导向杆和螺钉组成,其中把手通过螺钉与导向杆固定连接,把手和螺母进行螺纹配合[图 3(b)中的局部放大图 I]实现导向杆的驱动;螺母和导向杆进行精密滑动配合[图 3(b)中的局部放大图 II],实现导杆的精密导向。螺纹配合中润滑脂的缓慢蠕动不会改变滑动配合中的径向间隙,进而提高了微调丝杆结构的导向性和结

构稳定性。采用现有的加工技术可以将螺母和导向杆的径向配合间隙控制在几微米以内。文献[19]中提出的改进结构通过添加导向杆将原先耦合在螺纹配合中的导向和驱动功能进行解耦;一方面导向杆与螺母的精密滑动配合可以实现导向杆的精密导向,极大地减小了原先螺纹配合径向间隙所产生的倾角误差;另一方面所添加的滑动配合摆脱了螺纹配合中润滑脂的蠕动对导向杆倾斜状态的影响,提高了结构的稳定性。

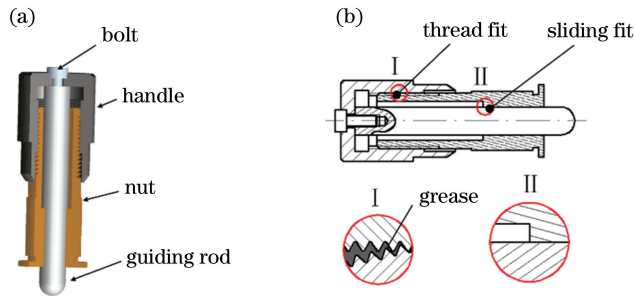


图 3 改进微调丝杆的结构。(a)截面图;(b)分析图

Fig. 3 Structure of improved adjustment screw. (a) Cross-section view; (b) analysis view

3 实验测试及分析讨论

为了验证改进微调丝杆结构在实际可调节支撑镜架中的有效性,采用两个相同结构的光学调整架

分别安装两种微调丝杆结构进行稳定性测试。两种微调丝杆结构都安装在光学调整架的相同驱动位置,其余点接触位置则采用钢珠实现,如图 4 所示。可以看出,驱动微调丝杆结构,可调节光学件绕 x

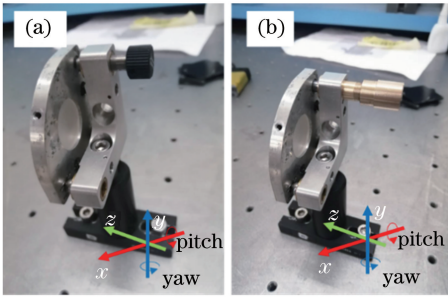


图 4 安装不同微调丝杆结构的光学调整架。
(a) 常用结构; (b) 改进结构

Fig. 4 Kinematic optical mount with different adjustment screw. (a) Common structure; (b) improved structure
轴的俯仰值。

3.1 测试方法

由于现有的稳定性测试方法只能对单个镜架进行测试, 对不同时间段所测得的结果进行对比, 将不可避免地引入环境变化带来的对比误差。因此, 本研究提出一种可在同一实验光路中直接对两种不同镜架稳定性进行对比的测试方法, 以避免环境不一致引入的对比误差, 实现更好的对比。该稳定性测试光路如图 5 所示。

该实验光路的仪器主要包括激光二极管 (635 nm)、分光镜、两个安装反射镜的测试镜架 (图 4)、衰减片、CCD、两个温度传感器以及两个功

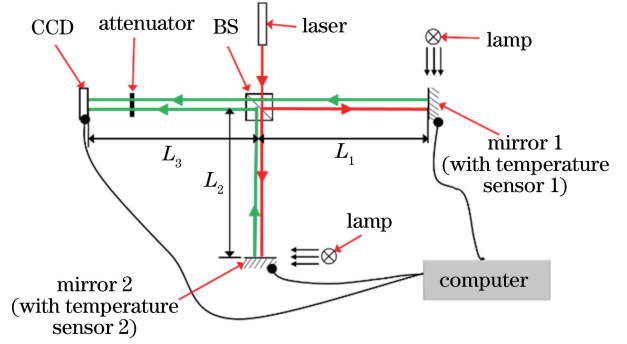


图 5 稳定性测试光路

Fig. 5 Light path for stability test

率可调的加热灯。光线从同一激光二极管射出, 通过分光镜分成两束光, 经过相同次数的透射和反射后回到同一 CCD。采用加热灯对两种镜架的相同位置进行一定时间的照射加热作为热冲击, 其中加热时间和加热最高温度保持一致。在两种光学调整架的相同位置粘贴温度传感器, 实时记录温度变化, 并对光斑位置图像进行定时存储。图 6 所示为所搭建的测试平台和光斑显示窗口。开机静置 2 h 作为热机阶段, 然后使用加热灯照射镜架 1 h 作为热冲击阶段, 最后静置足够长的时间使镜架温度恢复到室温状态, 表示完成一组热冲击实验。多次循环测试后通过对比角漂移量的大小实现对两种镜架的稳定性比较。

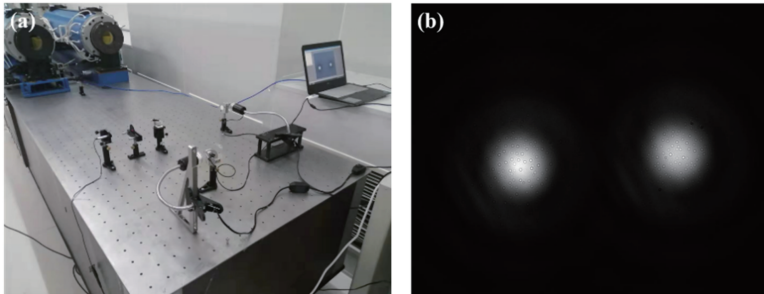


图 6 测试平台和光斑采集窗口。(a) 光学平台; (b) 镜测光斑采集窗口

Fig. 6 Test platform and acquisition window of light spot. (a) Optical platform; (b) acquisition window of light spot

每次测试结束后, 利用重心法提取光斑位置并转换为角位置, 光斑的横向和纵向漂移分别作为镜架在偏航和俯仰的角漂移, 按时间绘制两种结构的角漂移和温度变化曲线, 并提取数次热冲击结束后的角位置。角漂移的计算公式为

$$\Delta\theta_{\text{yaw}} = \frac{\Delta x \times e}{L_1 + L_2}, \quad (1)$$

$$\Delta\theta_{\text{pitch}} = \frac{\Delta y \times e}{L_2 + L_3}, \quad (2)$$

式中: $\Delta\theta_{\text{yaw}}$ 和 $\Delta\theta_{\text{pitch}}$ 分别为光学调整架在偏航和俯仰方向的角度变化量, 单位为 μrad ; Δx 和 Δy 为光

斑的横、纵坐标变化量, 单位为 e , 且 e 为单个像素值, $e = 8.3 \mu\text{m}$; L_1 、 L_2 和 L_3 的几何意义如图 5 所示, 且 $L_1 = L_2$ 。

相比于针对单个镜架稳定性的测试方法, 所提出的测试方法直接在同一光学实验中对不同光学镜架的稳定性进行对比测试: 一方面可降低实验对测试精度的要求, 只须对比角度漂移的相对变化量; 另一方面, 可避免不同时间段内由环境变化所引入的微小误差, 更好地进行对比。测试方法和分析结论可广泛应用于光学系统镜架的稳定性对比和选择中。

3.2 实验结果及分析

本实验参考索雷博公司^[20]所做的镜架稳定性测试进行相似的结果分析。索雷博公司做的是一种低漂移光学调整架,其稳定性在数次热冲击后漂移量小于 $1 \mu\text{rad}$,主要是因为采用了特殊的光学件无应力安装方式,且镜架材料采用了低膨胀系数的不锈钢材料,减小了漂移量。本实验研究的是两种微调丝杆结构对光学调整架的稳定性影响,选择容易加工但热膨胀系数较大的铝合金材料作为镜架主体材料,但热冲击后产生较大的绝对漂移量对结果对

比无影响。利用上述测量方法对图 4 所示的两个光学调整架进行稳定性对比测试,并利用重心法和(1)~(2)式计算得出两种镜架的角漂移量。图 7 所示为所采集的单组热冲击测试中两种光学调整架的角位置测试数据。热冲击加载前后,常用结构和改进结构在偏航方向的角漂移量分别为 $2.99 \mu\text{rad}$ 和 $3.16 \mu\text{rad}$;两种结构在俯仰方向的角度漂移量分别为 $62.31 \mu\text{rad}$ 和 $2.38 \mu\text{rad}$ 。可以看出,安装常用微调丝杆结构的光学调整架相比安装改进结构的光学调整架在俯仰方向上产生较大漂移。

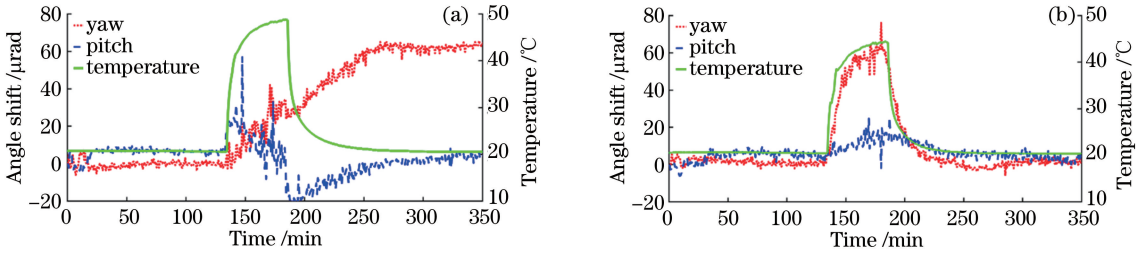


图 7 不同光学调整架的一组热循环测试结果。(a)常用结构;(b)改进结构

Fig. 7 Results from one thermal shocking test of different kinematic optical mounts.

(a) Common structure; (b) improved structure

为了进一步观察两种结构在数次热冲击后角漂移的变化情况,连续进行 14 次热冲击。提取每组测试中热冲击开始前 1 h 的数据和实验结束前 1 h 数据,取其平均值后分别作为每次热冲击前、

后的角位置,以减小环境存在的噪声干扰。图 8 所示为 14 次热冲击后两种结构的角漂移,其中温度变化为起始温度与每次测试结束时温度之间的差异。

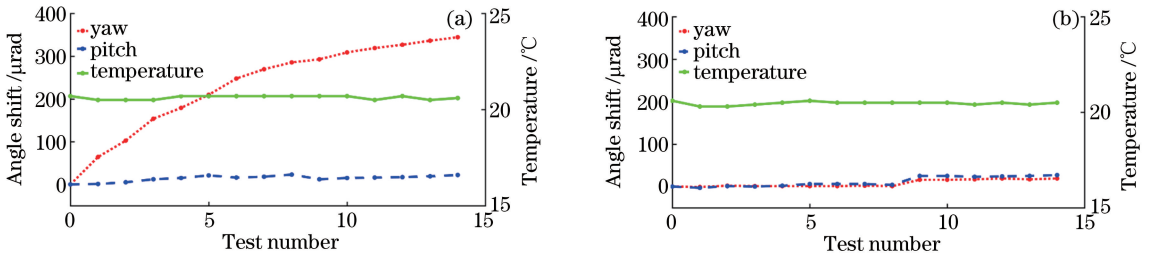


图 8 14 次热冲击后两种镜架的角漂移。(a)常用结构;(b)改进结构

Fig. 8 Angle shift of two optical mounts after 14 thermal shocks. (a) Common structure; (b) improved structure

从图 8 和表 1 可以看出,在 14 次热冲击后两种结构在俯仰方向的角度只发生了较小的改变,而安装常用微调丝杆结构的镜架偏航角($344.3 \mu\text{rad}$)相对于改进结构($19 \mu\text{rad}$)则产生很大的漂移量,这是因为常用微调丝杆结构中的螺纹配合之间存在较大的径向间隙,每次热冲击后所填充的润滑脂都会随时间产生缓慢的蠕变,直接导致丝杆相对螺母轴的

倾斜状态也发生缓慢的变化,表现为偏航角发生较大的漂移。而在改进的微调丝杆结构中,存在径向间隙较小的滑动配合,在热冲击下,润滑脂在螺纹配合径向方向的蠕变并不会改变导向杆相对螺母的倾斜状态,使得光学调整架的偏航角维持良好的稳定性。实验验证了改进微调丝杆结构在提升光学调整架稳定性方面的优异性。

表 1 14 次热冲击后两种光学调整架的角漂移量

Table 1 Angle shift of two optical mounts after 14 thermal shocks

Type of optical mount	Angle shift along yaw direction / μrad	Angle shift along pitch direction / μrad
Improved structure	19	27
Common structure	344.3	22

4 结 论

针对可调支撑结构中广泛采用的微调丝杆结构存在的不稳定性,设计出一种改进的微调丝杆结构,将原先微调丝杆结构中导向与驱动耦合的螺纹配合结构进行功能解耦,增加了专门起导向作用的导向杆,通过把手和螺母的螺纹配合实现导向杆的驱动,通过螺母和导向杆的精密滑动配合实现导向杆的精密导向。通过添加单独起导向作用的精密滑动配合,不仅可以提高微调丝杆结构的导向精度,同时摆脱了原先螺纹配合中润滑脂缓慢蠕动所引入的径向漂移,增强了微调丝杆结构的稳定性。利用现有的精密加工水平,可以将影响导向精度的径向配合间隙控制在几微米以内。该改进结构不仅提高了驱动精度,还有效地消除了原先螺纹配合中存在的径向间隙所引入的径向漂移。提出一种稳定性对比测试方法,该方法可在相同环境下实现不同镜架稳定性的对比测试,一方面可降低实验对测试精度的要求,只须对比角漂移的相对变化量;另一方面,避免了不同时间段由于环境变化所引入的微小误差,更好地进行对比分析。该测试方法可广泛应用于需要进行不同镜架稳定性的对比测量。对安装不同微调丝杆结构的光学调整架进行多次热冲击实验,结果表明,改进结构相比于常用结构可以减小螺纹配合径向间隙所引入的径向漂移,更好地维持光学调整架的位置稳定性。在要求光学支撑镜架具有较高位置稳定性的激光器和高功率激光装置等应用场合中,该微调丝杆组件可极大地提高可调支撑镜架的稳定性,更好地提升整体装置的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Sun G F, Tao F, Jiang B, et al. Microstructure and biomedical properties of laser alloyed Cu-Co alloys on medical stainless steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202008.
孙桂芳, 陶丰, 姜波, 等. 医用不锈钢激光合金化铜钴合金的组织及其生物医学性能[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202008.
- [2] Qiu X, Liu Z G, Wang S C. Pseudo-random coding of semi-active laser-guided weapon [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801008.
邱雄, 刘志国, 王仕成. 半主动激光制导武器的伪随机编码[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801008.
- [3] Bai L L, Wen X, Yang Y L, et al. 397.5 nm ultra-violet laser power stabilization based on feedback control via acousto-optic frequency shifter [J].

- Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001008.
白乐乐, 温馨, 杨煜林, 等. 基于声光频移器反馈控制的 397.5 nm 紫外激光功率稳定研究[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001008.
- [4] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002.
朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.
- [5] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: e54.
- [6] Jacobs S F. Variable invariables: dimensional instability with time and temperature [J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1026: 102650I.
- [7] Baskaran R, Sivakumar P, Arivuoli D. Dimensional stability of mirror materials for opto-mechanical reference system[J]. International Journal of Physical Sciences, 2013, 8(19): 997-1004.
- [8] Leahy Z N, Magner A J. A thermal mounting of optics in metallic housings[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8836: 88360P.
- [9] Pijnenburg J, te Voert M J A, de Vreugd J, et al. Ultra-stable isostatic bonded optical mount design for harsh environments[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8450: 845027.
- [10] Yu J C, Yuan J, Cong S S, et al. Design of adhesive structure for back-supported space reflector inserts [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0523002.
于霖晨, 袁健, 丛杉珊, 等. 背部支撑型空间反射镜镶嵌件粘接结构设计[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0523002.
- [11] Thorlabs Inc. Low wavefront distortion optical mount: US0175242 A1[P]. 2014-06-26.
- [12] Newport Inc. Optical mirror mount technology guide [EB/OL]. [2020-03-29]. <https://www.newport.com.cn/n/optical-mirror-mount-technology-guide>.
- [13] Kautz M, Close L M, Males J R. A locking clamp that enables high thermal and vibrational stability for kinematic optical mounts[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1070: 107032Q.
- [14] Tapply J K. Optical testing technique for the evaluation of mechanical mount thermal stability[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3786: 386-394.
- [15] Zona J P, Willis C L. Testing boresight stability of optomechanical subassemblies [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4444: 196-206.
- [16] Bullock K T, de Young R J, Sandford S P. Angular alignment testing of laser mirror mounts under temperature cycling [J]. NASA Technical Paper, 1997:3661.

- [17] Wang D H, Zhao J, Zhao X Q , et al. Measurement and analysis on structure stability of optical mirror mounts with small aperture [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(S1): 308-311.
王大辉, 赵军, 赵学庆 等. 小口径光学支撑镜架结构稳定性测试及分析[J]. 中国激光, 2010, 37(S1): 308-311.
- [18] Wallace J. Tip/tilt mirror mounts deliver accuracy, stability[J]. Laser Focus World: The Magazine for the Photonics & Optoelectronics Industry, 2014, 50 (11): 32-39.
- [19] Zhu J Q, Tang G X. Micro-movement subassembly for angle adjustment: US10289150B2 [P]. 2019-03-14.
- [20] Polaris® Low distortion mounts [EB/OL]. [2020-03-29]. https://www.thorlabschina.cn/newgroup/page9.cfm?objectgroup_id=6356.