

高精度激光光束准直系统设计

朱凡, 李颖先, 谭久彬

引用本文:

朱凡, 李颖先, 谭久彬. 高精度激光光束准直系统设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 817–826.
ZHU Fan, LI Ying-xian, TAN Jiu-bin. Design of high-accuracy laser beam collimation system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 817–826.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0817>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于荧光成像的准分子激光系统多路光束自动准直

Automatic alignment of multiplexed beams of excimer laser system based on fluorescence imaging
光学精密工程. 2015, 23(4): 949–955 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152304.0949>

高分辨力与高输出稳定性自准直系统设计

Design of high resolution and output stability autocollimation system
光学精密工程. 2016, 24(10s): 109–116 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0109>

压电驱动双面快速指向镜的设计

Design of double-sided fast steering mirror based on piezoelectric actuating
光学精密工程. 2016, 24(11): 2777–2782 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162411.2777>

热塑性塑料的光纤半导体激光透射焊接系统

Fiber-optic semiconductor laser transmission welding system for thermoplastics
光学精密工程. 2015, 23(10z): 42–46 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0042>

结合激光准直的二维转角动态测量系统

Two-dimensional rotation angle dynamic measurement system combining laser collimation
光学精密工程. 2019, 27(3): 561–568 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192703.0561>

文章编号 1004-924X(2020)04-0817-10

高精度激光光束准直系统设计

朱凡*, 李颖先, 谭久彬

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了进一步提高激光光束用作直线基准的精度, 建立了基于反射镜平动式光束稳定器以及两点式光束漂移分离法的高精度激光光束准直系统。首先, 对系统中基于反射镜平动的光束稳定器进行研究, 对其光束偏转原理以及影响因素进行分析, 并对两点式光束漂移分离方法进行介绍。然后, 对光束偏转单元的分辨力以及偏转范围、所使用的压电陶瓷非线性及迟滞特性、以及光束偏转单元的频率响应特性进行实验测试。最后, 对该激光准直系统的激光光束准直精度进行测试。实验结果表明: 本文提出的光束偏转单元在 $120 \mu\text{rad}$ 范围内的光束偏转分辨力可以达到 5 nrad , 频率响应特性高于 2 kHz ; 最终激光准直系统的准直精度在二维方向上分别达到 $1.9 \times 10^{-8} \text{ rad}$ 和 $2.1 \times 10^{-8} \text{ rad}$, 相对于现有技术约提高了 3 倍, 满足激光光束用作高精度直线基准的需求。

关键词: 激光准直; 直线基准; 光束漂移; 光束稳定

中图分类号: TH741.14; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0817

Design of high-accuracy laser beam collimation system

ZHU Fan*, LI Ying-xian, TAN Jiu-bin

(Center of Ultra-precision Optoelectronic Instrument Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: zf5016@126.com

Abstract: To further improve the accuracy of laser-beam linear datum, a high-accuracy laser collimation system based on a high resolution and high frequency response beam stabilizer and a two-point beam drift separation method was established in this study. First, the translation mirror-based beam stabilizer of the system was studied, and its beam deflection principle and influence factor were analyzed in addition with the two-point beam drift separation method. Then, the resolution and deflection ranges of beam stabilizer, the nonlinearity and hysteresis of piezo, and the associated frequency response were tested. Finally, experimental tests were conducted to determine the accuracy of the laser collimation system. Experimental results indicate that a resolution of 5 nrad of the beam stabilizer can be achieved in deflection range of $120 \mu\text{rad}$ with frequency response higher than 2 kHz . Furthermore, accuracies of $1.9 \times 10^{-8} \text{ rad}$ and $2.1 \times 10^{-8} \text{ rad}$ of the laser-beam collimation system in 2D directions are obtained, which are both 3 times higher than those corresponding to existing technology. The investigated system is, therefore, capable of satisfying the high accuracy requirements of linear datum using laser-beam.

Key words: laser collimation; linear datum; beam drift; beam stabilization

收稿日期: 2019-10-30; 修订日期: 2019-12-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51405107, No. 51775149); 黑龙江省博士后科研启动金资助项目 (No. LBH-Q17065)

1 引言

激光光束用作直线基准可以获得非常高的直线运动精度,如目前用于大型光学镜面形测量的纳米轮廓仪中,应用激光束作为直线基准达到了 60 nm/1 m 的直线运动精度^[1-2]。但是应用激光束作为直线基准普遍存在光束方向漂移的问题^[3-8],漂移严重影响了激光光束的准直精度,在应用中必须加以解决。

在实验室环境下,几米的短距离内激光光束方向漂移主要包括激光器谐振腔热变形导致的漂移以及传输路径中空气扰动造成的漂移,导致激光光束的准直精度仅能达到 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ rad 量级^[3-6]。针对激光光束方向漂移的问题,科研人员提出了多种解决方案^[3-13]。其中,双光束补偿准直法、相位板法等能够达到 10^{-6} rad 的准直精度^[9],采用闭环反馈法抑制激光光束漂移能够取得非常好的效果,能够达到 5×10^{-7} rad 的准直精度^[5],尤其是将激光束的平漂与角漂分离后分别加以控制,达到了 7×10^{-8} rad 的准直精度^[4-5]。对激光光束方向漂移进行闭环反馈控制时,控制精度一方面取决于漂移量的检测精度,另一方面则取决于漂移量控制单元的执行精度与频率响应速度。

对于漂移量的检测,本课题组已实现了激光光束平漂与角漂的相互分离并分别加以控制,取得了很高的准直精度^[4-5]。其中,角漂量的检测精度主要受限于光电检测电路的灵敏度以及所使用的聚焦透镜的焦距长度,并且平漂与角漂分离过程中存在一定程度的相互耦合,制约了最终光束漂移的控制精度,有待进一步改进。

对于漂移量控制单元,其作用是利用光束稳定器实现光束的平移或角度偏转。光束的平移可以采用压电陶瓷直接驱动反射镜平移来实现^[4-5],光束平移精度与响应速度直接取决于所使用压电陶瓷的位移输出精度与响应速度,而目前高性能压电陶瓷可以达到亚纳米量级超高位移分辨力以及数千赫兹的高频率响应速度^[14]。对于光束的角度偏转,目前已有较多的光束偏转装置,广泛应用于空间光通信、瞄准与跟踪等。常见的光束偏

转装置为机械式^[15-20],采用万向支架结构或柔性偏转结构实现反射镜的角度偏转,以实现出射光束的方向控制,通常具有体积较大、响应速度较慢的缺点,其光束偏转精度由驱动器的位移分辨力与驱动点到偏转轴的距离的比值决定,驱动器的位移分辨力可以达到亚纳米级,驱动点到偏转轴的距离越大则机构的转角分辨力越高,但机构的体积和质量会增大,导致转动惯量增大使得系统响应速度变慢。其他一些常见的光束偏转装置有声光偏转器^[21-22]、光电偏转器^[23-24]、液晶空间光偏转器^[25-27],一些新型的光束偏转装置如偏心透镜法^[28]、旋转棱镜法^[28]、微透镜阵列法^[29-31]、电润湿法^[32-33]等,在体积、响应时间、偏转角等方面均有不同程度的发展。但这些光束偏转方法仍有待于进一步的改进,以满足高精度激光直线基准应用中对激光光束方向漂移在小范围内的精确快速控制需求。

为了进一步提高激光光束的准直精度,本文建立了一套高精度激光光束准直系统。针对以上光束漂移控制中制约控制精度的两方面问题,提出一种基于反射镜平动的光束稳定器,利用反射镜平动实现激光光束的高灵敏度与高频响角度偏转;并提出一种两点式高精度光束漂移分离法,利用两个四象限光电探测器(Quadrant Photodiode Detector, QPD)的中心连线作为虚拟基准直线,实现激光光束漂移的精确检测与分离。最终对激光光束方向漂移进行高精度闭环控制,达到提高激光光束准直精度的目的。

2 工作原理

激光光束准直系统原理图如图 1 所示。其中,激光光源采用的是带单模光纤耦合的半导体激光器,半导体激光器发出的激光耦合进入单模光纤,由单模光纤及光纤准直镜出射的准直激光光束沿 x 正向传输,由聚焦透镜会聚,由反射镜 FM1 将其传输方向转换为 z 正向,依次经过平动反射镜 TM1 与压电陶瓷 PZT1 组成的垂直方向光束角度偏转单元将光束方向转换为 y 正向、由反射镜 FM2 将光束方向转换为 z 正向、平动反射镜 TM2 与压电陶瓷 PZT2 组成的水平方向光束

角度偏转单元将光束方向转换为 x 负向,平动反射镜 TM1 与平动反射镜 TM2 分别对光束在垂直(y 向)和水平(x 向)传输方向进行角度偏转,抑制激光光束的角漂;然后光束经过准直透镜,由会聚光束重新成为准直平行光束,依次经过平动反射镜 TM3 与压电陶瓷 PZT3 组成的水平(x 向)方向光束平移单元将光束方向转换为 z 正向、反射镜 FM3 将光束方向转换为 y 负向、平动反射镜 TM4 与压电陶瓷 PZT4 组成的垂直(y 向)方向光束平移单元将光束方向转换为 z 正向,分别对光束在水平(x 向)和垂直(y 向)传输方向进行位置平移,抑制激光光束的平漂。QPD 1 与 QPD 2 用于检测经过角漂和平漂抑制后激光光束的准直精度。QPD 1 与 QPD 2 的中心连线可以作为一条虚拟直线基准,将激光光束的方向矢量与该虚拟直线基准进行比较,从而分离出激光光束的角漂量与平漂量,反馈给光束稳定器实现对激光光束方向的闭环控制。激光光束的角漂和平漂得到抑制后,大幅提高了方向稳定性,从而提高了其准直精度。

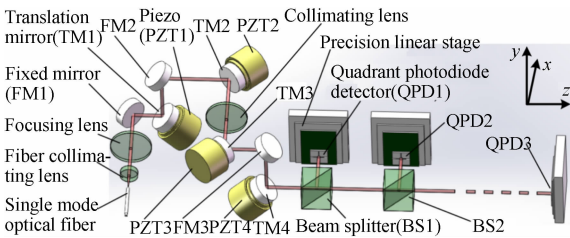


图 1 激光光束准直系统原理图。

Fig. 1 Schematic diagram of laser beam collimation system

3 单元设计

3.1 基于反射镜平动的光束稳定器

采用闭环反馈的激光光束准直系统中,光束稳定器是实现光束方向偏转与位置平移的执行器件。本文提出的光束稳定器中,光束角度偏转采用两个共焦放置的透镜以及压电陶瓷与平动反射镜构成的平移镜组来实现。如图 2(a)所示,聚焦透镜的后焦面与准直透镜的前焦面重合,构成无

焦系统。入射的准直光束经过聚焦透镜会聚后,再经准直透镜重新成为准直光束出射。如果经聚焦透镜会聚后的光束中心轴线相对于准直透镜的光轴有偏离,根据几何光学原理,该光束经准直透镜后的出射方向将发生角度偏转,如图 2(b)所示。

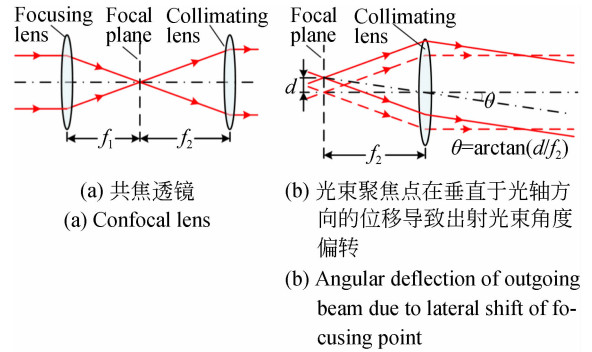


图 2 共焦透镜实现光束角度偏转

Fig. 2 Beam deflection realized by confocal lens

出射光束的偏转角 θ 可以由准直透镜的焦距 f_2 与平移镜组对光束经聚焦透镜后聚焦点平移的距离 d 来确定:

$$\theta = \arctan(d/f_2). \quad (1)$$

通过精确控制经聚焦透镜聚焦后的光束中心轴线相对于准直透镜光轴的偏离量,可以实现出射光束方向的精确控制。要达到这一点,一种实现的途径是采用偏心透镜法,直接在垂直于光轴的方向上平移准直透镜^[23]。本文根据激光光束准直领域中对激光光束在微小角度范围内达到非常高的角度偏转精度的要求,利用压电陶瓷驱动平移镜组,直接在垂直于光轴方向上平移经聚焦透镜会聚后的光束聚焦点位置。

如图 3(a)所示,在两个共焦放置的透镜之间设置一组平移镜组,平移镜组由两片平行放置的平面反射镜组成。其中一片固定,另一片固定于压电陶瓷的位移输出端,由压电陶瓷驱动,实现对光束聚焦点的平移,从而实现对出射光束的角度偏转。如图 3(b)所示,该光束稳定器中,出射光束角度偏转量 θ 由平移镜组中压电陶瓷驱动反射镜的平移量 Δ 和准直透镜的焦距 f_2 表示为:

$$\theta = \arctan(\sqrt{2}\Delta/f_2). \quad (2)$$

该光束稳定器中,光束角度的偏转分辨力与偏转范围,由压电陶瓷的位移分辨力和最大位移输出量与准直透镜焦距的比值来决定。以目前普遍能够达到的具有 1 nm 分辨力和 12 μm 最大位移输出量的压电陶瓷为例,准直透镜焦距 $f_2=100\text{ mm}$ 时,该光束稳定器的光束角度偏转分辨力和偏转范围分别可以达到 10 nrad (0.002") 和 120 μrad (24"), 满足激光光束准直应用中对光束漂移量在小角度范围内进行精确控制的需求。

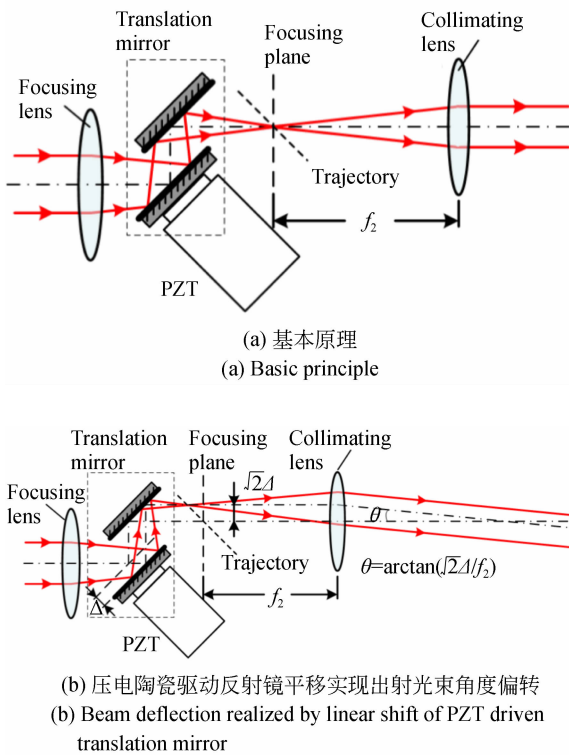


图 3 基于反射镜平动的光束角度偏转方法

Fig. 3 Translation mirror based beam deflection method

从图 3 可以看出,利用平移镜组对光束聚焦点位置进行平移时,光束聚焦点的运动轨迹与光轴方向呈 45° 角,在光束偏转过程中光束聚焦点相对于准直物镜焦面产生离焦,进而影响到出射光束的平行性。该光束平行性变化,将导致后续光束漂移检测单元中 QPD 接收到的光斑尺寸与光强分布发生变化,从而影响到 QPD 对光束漂移量的检测灵敏度。如图 3(b) 所示,光束聚焦点离焦量 d_f 与压电陶瓷驱动反射镜的平移量 Δ 之

间的关系可以表示为:

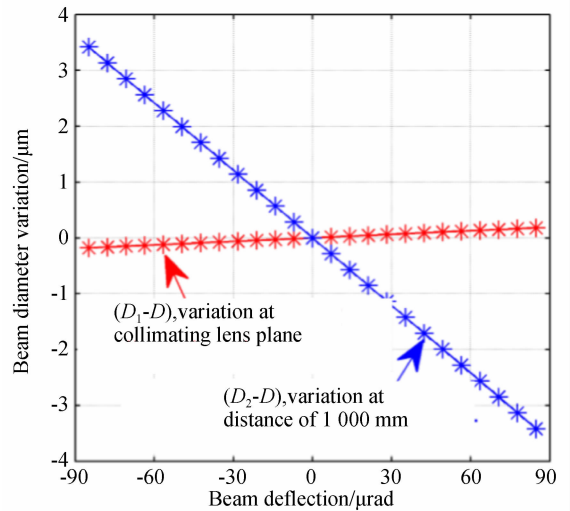
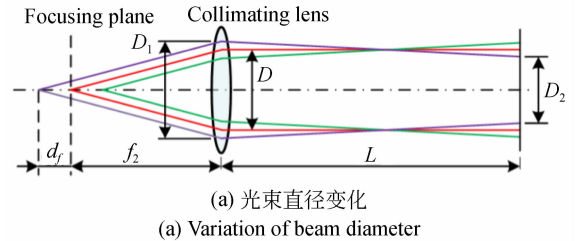
$$d_f = \sqrt{2}\Delta. \quad (3)$$

如图 4(a) 所示,假设在未离焦的情况下出射光束直径为 D , 当存在离焦时准直透镜面处光束直径为 D_1 , 距离为 L 位置处光束直径为 D_2 , 则有:

$$D_1 = \left(1 + \frac{d_f}{f_2}\right)D, \quad (4)$$

$$D_2 = \left(1 - \frac{L-f_2}{f_2} \cdot \frac{d_f}{f_2}\right)D. \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可以计算出,当压电陶瓷最大输出位移量为 12 μm 、准直透镜焦距为 100 mm 时,在距离 1 000 mm 位置处,对于直径为 3 mm 的光束,其直径最大变化量仅为 3.4 μm , 相对变化量为 0.11%, 如图 4(b) 所示,其影响可完全忽略。



(b) 离焦导致光束直径随偏转角度的变化量
(b) Beam deflection realized by linear shift of PZT driven translation mirror

图 4 光束偏转器中离焦导致光束直径变化

Fig. 4 Variation of beam diameter due to defocus in stabilizer

以上基于反射镜平动的光束稳定器中,光束的角度偏转由压电陶瓷驱动其位移输出端固定的平面反射镜来实现,具有高位移灵敏度和小运动惯量的特点。相对于传统的压电陶瓷驱动反射镜偏转实现光束角度偏转的方式,该光束稳定器理论上可以获得更高的光束角度偏转灵敏度和频率响应速度。

3.2 两点式光束漂移分离法

激光光束方向漂移量的精确探测与分离,是实现漂移量闭环反馈控制的基础。在本设计中,采用两片相隔一定间距 L_Q 的 QPD 在沿着激光光束的传输方向上进行布置,如图 5 所示。

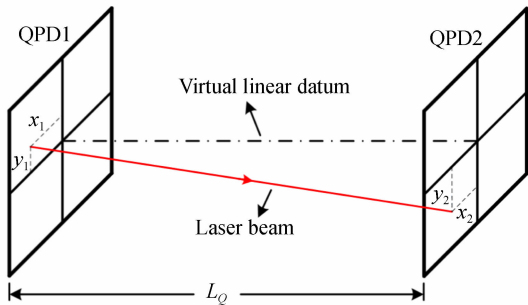


图5 两点式光束漂移探测与分离法

Fig. 5 Schematic diagram of two-point beam drift detection and separation method

基于两点唯一确定一条空间直线的原理,将该两片 QPD 的中心连线作为一条虚拟基准直线,将激光光束的方向矢量与该虚拟基准直线相比较,实现对激光光束方向角漂量和平漂量的探测与分离。任何相对于该虚拟基准直线的激光光束方向偏移或空间位置平移,均被反馈至光束稳定器中实现闭环控制。激光光束在二维方向上的平漂量和角漂量分别如下:

$$AD = \left(\arctan \frac{x_2 - x_1}{L_Q}, \arctan \frac{y_2 - y_1}{L_Q} \right), \quad (6)$$

$$LD = (x_1, y_1). \quad (7)$$

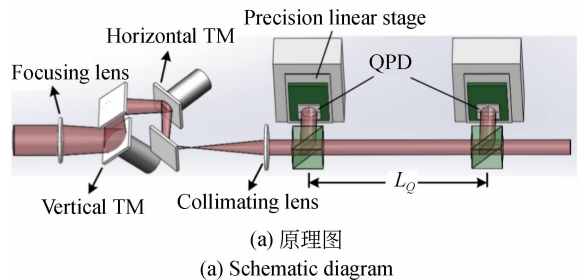
在图 1 所示系统中,反馈单元根据 QPD1 和 QPD2 的输出信号,按照式(6)解算出二维角漂量,并反馈给由聚焦透镜、固定反射镜 FM1、平动反射镜 TM1、固定反射镜 FM2、PZT1、平动反射镜 TM2、PZT2、准直透镜组成的二维角漂量

控制单元,对激光光束的二维角漂量进行闭环控制;同时,反馈单元根据 QPD1 和 QPD2 的输出信号,按照式(7)解算出二维平漂量,并反馈给由平动反射镜 TM3、PZT3、固定反射镜 FM3、PZT4、平动反射镜 TM4 组成的二维平漂量控制单元,对激光光束的二维平漂量进行闭环控制。最终得到的激光光束准直精度,是系统对激光光束的角漂量和平漂量进行综合抑制后的结果。

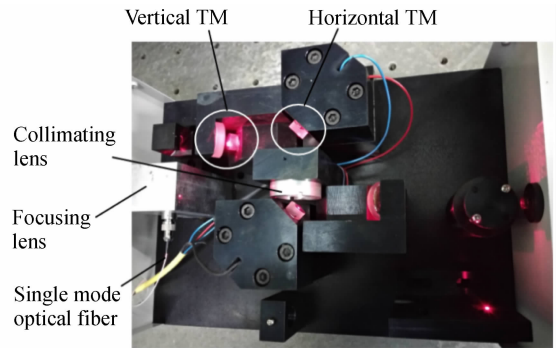
4 实验测试与结果

4.1 光束偏转分辨率与偏转范围

对基于反射镜平动的光束稳定器的光束偏转分辨率和偏转范围进行测试,实验装置如图 6 所示。测试装置采用两个正交放置的平移镜组实现二维方向光束偏转;两个 QPD 间距 200 mm,沿出射激光光束布置,用于监测激光光束方向偏移。



(a) 原理图
(a) Schematic diagram



(b) 实物图
(b) Physical map

图6 光束稳定器的光束偏转分辨率和偏转范围测试装置

Fig. 6 Test setup for beam deflection resolution and range of proposed beam stabilizer

该测试装置中,需要首先测试 QPD 的光斑位移检测灵敏度,从而根据 QPD 的输出结果确定激光光束的方向偏移量。由于 QPD 对光斑位移检测灵敏度显著依赖于光斑尺寸及光强分布,因此这里直接将 QPD 安装于测试装置光路中进行在线测试。如图 6(a)所示,将 QPD 安装于精密位移台上,激光光源预热时间足够长,并且光束稳定器固定不动。精密位移台带动 QPD 进行小位移步进,同时采集 QPD 的输出,该输出即反映了 QPD 与光斑之间的相对位移,从而确定出 QPD 对光斑的位移检测灵敏度。当精密位移台带动 QPD 进行 2 nm 和 1 nm 步进时, QPD 的输出分别如图 7(a)和 7(b)所示,可以看出, QPD 能够清晰分辨出 1 nm 的步进量。利用 QPD 的输出电压与精密位移台的输出位移量,可以计算出 QPD 对光斑位移检测灵敏度为 3.7 mV/nm。

QPD 对于平漂量进行检测时,平漂量仅体现为光斑相对于 QPD 中心的位置平移,因此, QPD 对光斑位移的分辨力直接反映了它对于光束平漂量的检测能力。根据图 7(b)可以得出,本实验中 QPD 对激光光束平漂量的检测分辨力可以达到 1 nm。

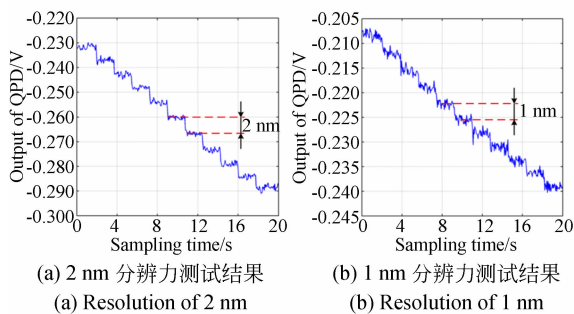


图 7 QPD 对光斑位移分辨力测试结果

Fig. 7 Test results of spot displacement resolution of QPD

将两 QPD 固定,压电陶瓷驱动反射镜以 1 nm 步进量平移,同时采集 QPD 的输出,以测试光束稳定器的光束角度偏转分辨力。测试结果如图 8 所示。

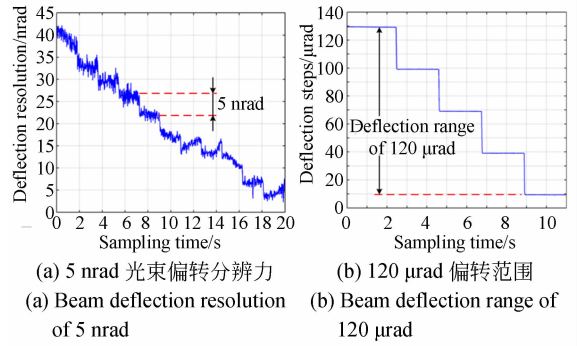
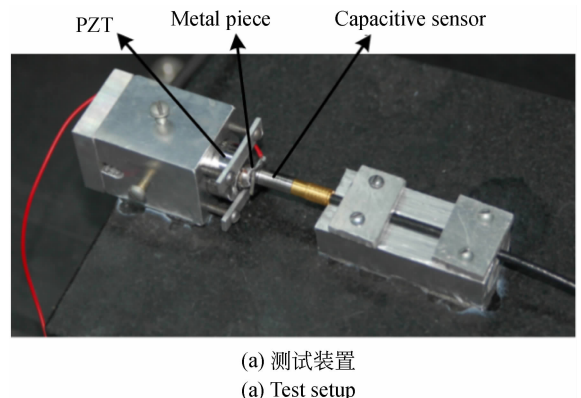


图 8 所提出的光束稳定器的光束偏转分辨力测试结果

Fig. 8 Test results of beam deflection resolution of proposed beam stabilizer

4.2 压电陶瓷非线性与迟滞特性

本文中光束稳定器采用压电陶瓷驱动反射镜平移实现光束角度偏转。压电陶瓷的非线性响应以及迟滞特性将显著影响光束稳定器的输出精度,尤其是当压电陶瓷的输出在纳米量级时。这里采用米依 CS02 型电容传感器对压电陶瓷的位移输出进行测试,测试装置如图 9(a)所示。压电陶瓷电源在 $-600 \sim 600$ V 内输出电压,驱动压电陶瓷产生位移。从图 9(b)测试结果可以看出,压电陶瓷全行程 $\pm 6 \mu\text{m}$ 内输出正向和负向位移时的非线性分别为 3.36% 和 5.37%,相应的最大光束角度偏转误差为 $4.03 \mu\text{rad}$ 和 $6.44 \mu\text{rad}$ 。从图 9(c)可以看出,该压电陶瓷的最大迟滞量为 $1.035 \mu\text{m}$,由此导致的光束稳定器的输出迟滞量为 $10.35 \mu\text{rad}$ 。由此可见,当光束稳定器工作于开环状态时,压电陶瓷的非线性响应和迟滞特性会显著影响光束



(a) 测试装置
(a) Test setup

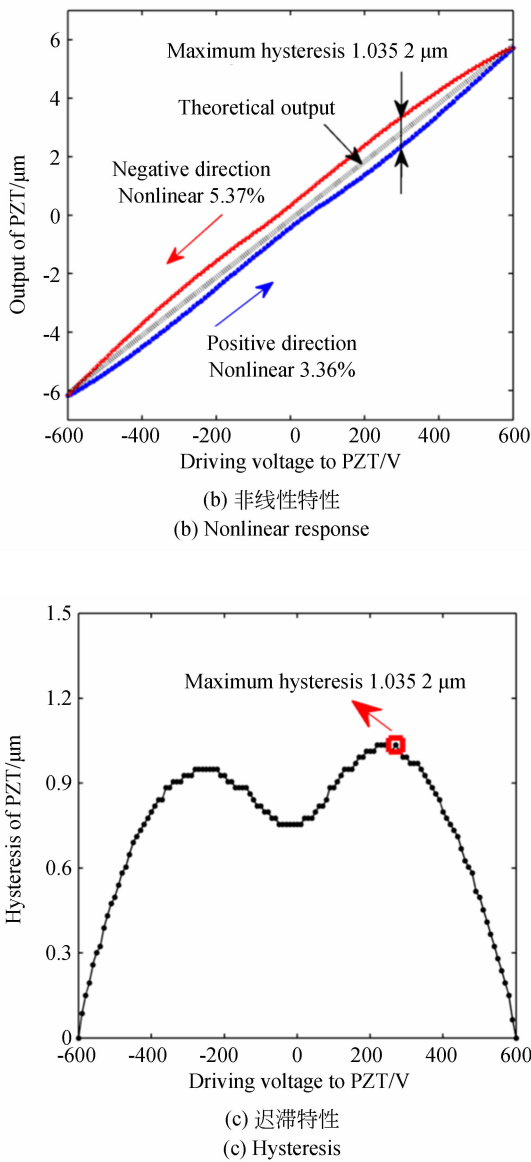


图 9 压电陶瓷位移输出特性测试结果

Fig. 9 Test results of displacement output characteristics of PZT

稳定器的输出特性,因此应采用闭环工作方式以获得高输出精度。在压电陶瓷上集成电容传感器,对压电陶瓷的输出构成局部闭环,以此大幅度减小压电陶瓷自身的非线性和迟滞特性的影响。

4.3 光束稳定器频响特性

本文光束稳定器中,光束偏转通过直接驱动粘贴于压电陶瓷位移输出端的反射镜来实现,其频率响应特性也可以采用图 9(a)所示装置进行测试。测试过程中,信号发生器产生某一频率的

正弦信号,输入至压电陶瓷电源,驱动压电陶瓷输出正弦位移,该位移量由电容传感器监测,并与信号发生器产生的正弦信号进行比较,从而得到压电陶瓷的幅频特性和相频特性。测试结果如图 10 所示,可以看出,该光束稳定器的频响特性大于 2 kHz。

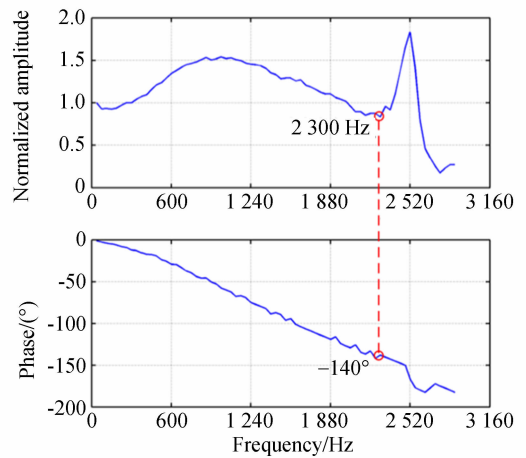
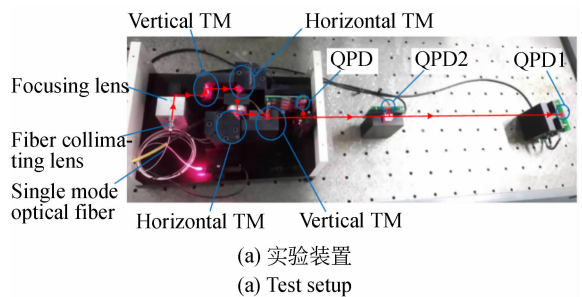


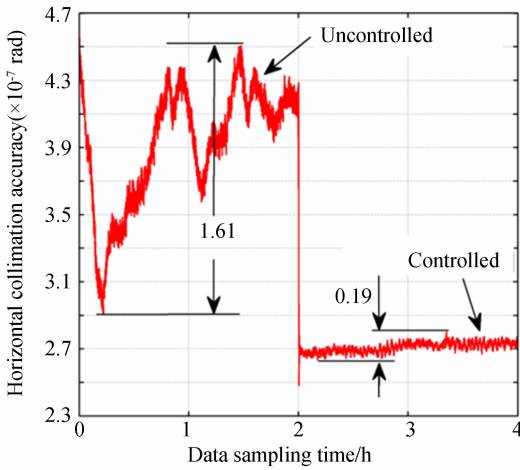
图 10 压电陶瓷位移输出特性测试结果

Fig. 10 Test results of displacement output of PZT

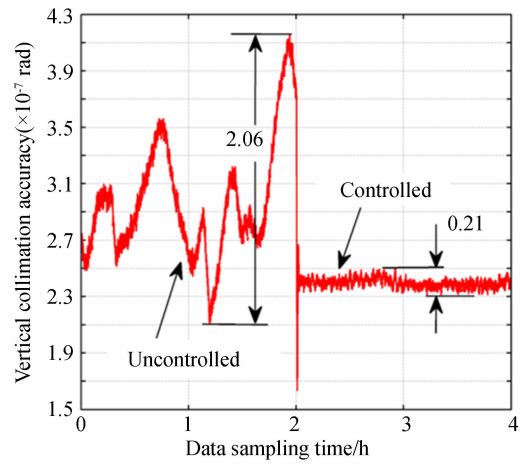
4.4 激光光束准直精度测试

在以上各单元测试基础上,按图 1 所示激光光束准直系统原理图,组建了激光光束准直系统实验装置,如图 11(a)所示。其中 QPD1 与 QPD2 相距 500 mm,用于检测最终激光光束的准直效果,测试过程在恒温、隔振的洁净间环境中进行。测试结果如图 11(b)和 11(c)所示,采用闭环控制后,500 mm 位置处激光光束的准直精度在二维方向上 2 h 内分别可以达到 1.9×10^{-8} rad 和 2.1×10^{-8} rad,采用本文提出的基于反射镜平动的光束稳定器和两点式光束方向漂移分离法,实现了高精度激光光束准直。





(b) 水平方向光束准直精度
(b) Horizontal beam collimation accuracy



(c) 垂直方向光束准直精度
(c) Vertical beam collimation accuracy

图 11 激光光束准直实验测试

Fig. 11 Experimental tests of laser-beam collimation

5 结 论

本文根据目前激光光束用作直线基准的高精度需求,提出基于反射镜平动的光束稳定器和两点式光束漂移分离法,实现对激光光束方向漂移的高精度闭环控制。对该激光光束准直系统的组

成及主要单元模块的设计进行了介绍,并对该系统的激光光束准直精度进行了测试。实验结果表明:该激光光束准直系统在二维方向上 2 h 准直精度分别达到 1.9×10^{-8} rad 和 2.1×10^{-8} rad,相对于现有技术约提高了 3 倍,大幅提高了激光光束的准直精度,满足激光光束用作高精度直线基准的需求。

参考文献:

- [1] YANG H S, KIM S W, WALKER D. Novel laser datum system for nanometric profilometry for large optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2003, 11(6): 624-631.
- [2] WALKER D, YANG H S, KIM S W. Novel hybrid stylus for nanometric profilometry for large optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2003, 11(15): 1793-1798.
- [3] WANG K W, ZENG L J, YIN C Y. Influence of the incident wave-front on intensity distribution of the nondiffracting beam used in large-scale measurement[J]. *Optics Communications*, 2003, 216(1): 99-103.
- [4] ZHAO W Q, TAN J B, QIU L R, *et al.*. Enhancing laser beam directional stability by single-mode optical fiber and feedback control of drifts[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(3): 036101.
- [5] ZHAO W Q, QIU L R, FENG Z D, *et al.*. Laser beam alignment by fast feedback control of both linear and angular drifts[J]. *Optik*, 2006, 117(11): 505-510.
- [6] UCHIKOSHI J, SHIMADA S, IKAWA N, *et al.*. Straightness measurement using laser beam straight datum [J]. *SPIE*, 1995, 2576: 315-322.
- [7] 杨飞, 安其昌, 张静, 等. 大口径光学系统的镜面视宁度检测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2572-2579.
YANG F, AN Q CH, ZHANG J, *et al.*. Seeing metrology of large aperture mirror of telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2572-2579. (in Chinese)
- [8] 朱凡, 谭欣然, 谭久彬, 等. 高分辨力与高输出稳定性自准直系统设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 109-116.
ZHU F, TAN X R, TAN J B, *et al.*. Design of high resolution and output stability autocollimation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 109-116. (in Chinese)
- [9] 方仲彦, 殷纯永, 梁晋文. 高精度激光准直技术的

- 研究(二)[J]. 航空计测技术, 1997, 17(2): 6-8, 15.
- FANG ZH Y, YIN CH Y, LIANG J W. Study on high accuracy laser alignment technique [J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 1997, 17(2): 6-8, 15. (in Chinese)
- [10] LUO D, KUANG C F, HAO X, *et al.*. High-precision laser alignment technique based on spiral phase plate[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(7): 944-949.
- [11] HAO Q, LI D C, WANG Y T. High-accuracy long distance alignment using single-mode optical fiber and phase plate[J]. *Optics and Laser Technology*, 2002, 34(4): 287-292.
- [12] KUANG C F, FENG Q B, ZHANG B, *et al.*. A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. *Sensors and Actuators A-physical*, 2005, 125(1): 100-108.
- [13] FENG Q B, ZHANG B, KUANG C F. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(4): 279-283.
- [14] <https://www.physikinstrumente.com/en/products/linear-actuators/nanopositioning-piezo-actuators/p-820-preloaded-piezo-actuators-100500/#specification>.
- [15] SHEN G, GAYHART A R, EATON D J, *et al.*. Large-angle fast-steering mirrors[C]. *San Diego, Proc SPIE 1543, Active and Adaptive Optical Components, San Diego, CA, USA*, 1992; 286-293.
- [16] HEDDING L R, LEWIS R A. Fast steering mirror design and performance for stabilization and single axis scanning [J]. *SPIE*, 1990, 1304: 14-24.
- [17] GERMANN L M, BRACCIO J. Fine-steering mirror technology supports 10 nanoradian systems[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1351-1359.
- [18] SHEN G Y, GAYHART A R, EATON D J, *et al.* Large-angle fast-steering mirrors [J]. *SPIE*, 1992, 1543: 286-293.
- [19] WU X, CHEN S H, SHI B Y, *et al.*. High-powered voice coil actuator for fast steering mirror[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(2): 023002.
- [20] SWEENEY M N, RYNKOWSKI G A, KETABCHI M, *et al.*. Design considerations for fast-steering mirrors (FSMs) [J]. *SPIE*, 2002, 4773: 63-73.
- [21] NIKULIN V V, BOUZOUBAA M, SKORMIN V A, *et al.*. Modeling of an acousto-optic laser beam steering system intended for satellite communication[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(10): 2208-2214.
- [22] PINNOW D A. Acousto-optic light deflection: design considerations for first order beam steering transducers[J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1971, 18(4): 209-214.
- [23] BARBOZA R, ALBERUCCI A, ASSANTO G. Large electro-optic beam steering with nematics [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2725-2727.
- [24] SCRYMGEOUR D A, BARAD Y, GOPALAN V, *et al.*. Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO₃ fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34): 6236-6241.
- [25] ENGSTROM D, OCALLAGHAN M J, WALKER C K, *et al.*. Fast beam steering with a ferroelectric-liquid-crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(9): 1721-1726.
- [26] LIZANA A, MARQUEZ A, LOBATO L, *et al.*. The minimum Euclidean distance principle applied to improve the modulation diffraction efficiency in digitally controlled spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10581-10593.
- [27] BECK R J, PARRY J P, MACPHERSON W N, *et al.*. Application of cooled spatial light modulator for high power nanosecond laser micromachining[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17059-17065.
- [28] GIBSON J L, DUNCAN B D, BOS P, *et al.*. Wide angle beam steering for Infrared Countermeasures applications [J]. *SPIE*, 2002, 4723: 100-111.
- [29] AKATAY A, UREY H. Design and optimization of microlens array based high resolution beam steering system[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4523-4529.
- [30] BOURDERIONNET J, RYNGENHAGEN M, DOLFI D, *et al.*. Continuous laser beam steering with micro-optical arrays: experimental results [J]. *SPIE*, 2008, 7113: 1-11.
- [31] AKATAY A, WADDIE A, SUYAL H, *et al.*. Comparative performance analysis of 100% fill-

factor microlens arrays fabricated by various methods [J]. *SPIE*, 2006, 61850C: 1-11.

- [32] SMITH N, ABEYSINGHE D C, HAUS J W, *et al.*. Agile wide-angle beam steering with electrowetting micropisms [J]. *Optics Express*,

2006, 14(14): 6557-6563.

- [33] SMITH N R. *Investigation of the performance potential for arrayed electrowetting micropisms* [D]. Dissertations & Theses - Gradworks, University of Cincinnati, 2009: 1-7.

作者简介:



朱 凡(1986—),男,湖北随州人,副研究员,2007年、2009年、2013年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光电测量仪器方面的研究。E-mail: zf5016@126.com



谭久彬(1955—),男,黑龙江省阿城人,中国工程院院士,教授,博士生导师,1982年、1987年、1991年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长,主要从事超精密测量与仪器技术、超精密光机电一体化装备技术、超精密激光测量与探测技术等方面的研究。E-mail: jbtan@hit.edu.cn