

应变式压电光学偏转器的集成设计及性能测试

王 耿¹, 周克辛¹, 周 虹²

¹河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;

²中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 提出了一种应变反馈式压电驱动光学偏转器。首先介绍压电光学偏转器的机械结构及内部组成原理, 光学偏转器内部集成两个应变反馈式压电驱动器, 来实现对镜面的驱动及其角位移测量。然后自准直仪用于校准偏转器, 获得的偏转精度为 $0.05'$, 并进行一系列开闭环实验以验证定位和跟踪性能。实验结果表明: 在开环模式下, 30 min 的定位时间内出现 12.60% 的蠕变, 对变幅值三角波的偏转跟踪误差占偏转量程的 13.70%; 在闭环模式下, 蠕变基本得到消除, 对变幅值三角波的偏转跟踪误差占偏转量程的 4.31%。因此所设计的压电光学偏转器结构合理, 性能稳定, 具有较好的工程应用价值。

关键词 光学器件; 应变反馈; 压电光学偏转器; 迟滞; 蠕变

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.082301

Integrated Design and Performance Test for Strain Type Piezoelectric Optical Deflector

Wang Geng¹, Zhou Kexin¹, Zhou Hong²

¹School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

²Key Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract A kind of strain feedback type piezoelectric optical deflector is presented. The mechanical structure and internal composition principle are firstly introduced for the optical deflector. Two strain feedback type piezoelectric actuators are integrated within the optical deflector, which is used to actuate the mirror and measure its angle displacement. An autocollimator is used to calibrate the deflector, and the obtained deflection accuracy is $0.05'$. And then a series of tests are conducted to validate the positioning and tracking performances for both open and closed loop operations. Experimental results show that, the value of creep reaches 12.60% within 30 min and the tracking error for the varied-amplitude triangular-wave reaches 13.70% of the full scale in open loop mode. In closed loop mode, the creep effect is basically eliminated and the tracking error reaches 4.31% of the full scale. The designed piezoelectric optical deflector has good engineering application value for its reasonable structure and stable performance.

Key words optical devices; feedback based on strain; piezoelectric optical deflector; hysteresis; creep

OCIS codes 230.4685; 230.2090

1 引 言

近年来, 各类微驱动定位系统已在航空航天、微纳米操作、能动光学、自适应光学等领域^[1-4]被用来实现对目标的高精度定位与跟踪, 为此人们设计了微驱动系统以满足不同需求^[5-8]。

目前, 微驱动定位的驱动器以音圈电机和压电执行器(PA)为主。音圈电机具有运动行程大、无滞后、无传动间隙等优点, 但存在惯量大、谐振频率低、高频相位裕度有限等缺点。PA 是实现纳米级驱动定位的主

收稿日期: 2017-02-23; 收到修改稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51505133)

作者简介: 王 耿(1984—), 男, 博士, 讲师, 主要从事压电驱动与控制系统等方面的研究。E-mail: wgmouse@163.com

流元件,因具有更高的定位精度而得到了更多关注。尽管 PA 具有良好的性能,如较高的定位精度、较快的响应速度、较高的谐振频率、较大的驱动力、适于电磁和真空应用等,然而也存在着一些固有缺点,如应变量小、发热、具有非线性特性^[9]等,给精密定位跟踪系统带来了一定障碍^[10]。为了克服其应变量小难以探测的困难,相关科研人员^[11]设计了一种特殊的应变反馈式微型驱动器解决了这一工程难题,使得该驱动器在狭小工作空间的应用领域具备了很好的实用性。

压电驱动式倾斜反射镜^[12](PFSM)是现代光机电系统中的一类关键元器件,其镜面在执行器的驱动下能够实现快速微小角度的偏转,改变光束传输方向,从而实现对激光光束的快速精确定位。根据应用领域的不同,可以分为快速倾斜镜、快速反射镜、快速偏摆镜、偏转镜、激光扫描器^[13]、高精度指向镜、光束跟踪镜等。随着 PFSM 的不断发展,更高跟踪精度的 PFSM 将会极大提高系统的性能,促进相关应用领域的进一步发展。

目前自适应光学系统中,倾斜反射镜因结构紧凑不适合在其内部集成大体积传感器,所以实验中经常采用哈特曼波前传感器^[14-15]来替代。虽然哈特曼波前传感器可以用来探测光路中的波前畸变,并提供给外部环路进行闭环控制,但是压电驱动的波前校正器具有迟滞蠕变等非线性效应,限制了系统闭环性能的进一步提高。为此,本文设计了一个紧凑型压电光学偏转器来对压电倾斜反射镜进行改进,通过应变反馈实现内部闭环以期获得较好的性能。文章首先介绍压电光学偏转器的结构设计、工作原理及原型研制,然后分别测试开闭环性能及验证实用性。

2 应变式压电光学偏转器的原型设计

2.1 压电光学偏转器的设计制作

应变式压电光学偏转器的内部结构示意图如图 1 所示,其中 1 为镜座、2 为柔性偏转极头、3 为中间支柱、4 为应变反馈式压电驱动器、5 为底座接头、6 为底座,加工装配后的实物图如图 2 所示。除去镜面、镜座、柔性偏转极头和中间支柱等辅助部件外,主要驱动部件是单独设计的两个紧凑型应变反馈式压电驱动器,它们与其他部件之间采用高强度胶水进行连接。另外,中间支柱、底座接头、底座和外壳等部分都采用了 45# 钢。

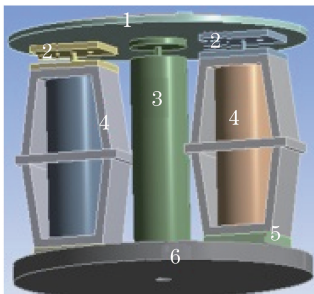


图 1 压电光学偏转器内部主要结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of internal main structure of piezoelectric optical deflector

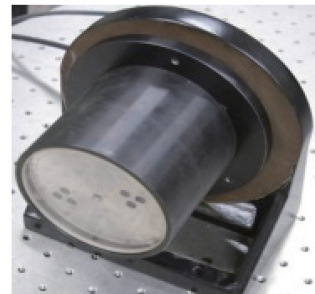


图 2 压电光学偏转器实物图
Fig. 2 Photo of piezoelectric optical deflector

两个紧凑型应变反馈式压电驱动器在中间支柱两侧对称布局,二者在驱动电压的作用下,一个伸长一个缩短,从而实现偏转器的镜面偏转动作,其内部的应变传感器能够检测压电驱动器的输出位移量,并通过后续 3.1 小节的标定实验得到镜面的偏转角度。该偏转器的镜面采用 K4 玻璃材料,口径为 100 mm,镜面峰谷值为 $0.19 \mu\text{m}$,其面形如图 3 所示。另外,柔性偏转极头是一个弹性柔性部件,在驱动器伸长或缩短时对镜面的偏转动作起到缓冲作用。

压电光学偏转器有开环和闭环两种工作模式:当内部的应变位移传感器不工作时为开环模式,此时的偏转角会受到迟滞非线性效应的影响;当反馈应变位移信号时,形成了一种内部位移信号的小闭环,偏转精度在控制器的配合下将会有明显提高。

分析偏转器的动态性能,采用有限元软件分析模态频率,所得的前三阶固有频率分别为 409.48, 629.92,

880.61 Hz。再进行扫频测试实验,得到实际的频率响应曲线如图 4 所示,可知偏转器具有较复杂的模态。第一阶模态主要是由柔性偏转极头引起的,对极头的合理设计可以提高谐振频率。柔性偏转极头的柔度过大,会拉低偏转器的一阶谐振频率;相反,柔度过小即刚度过大,则起不到缓冲作用,在 PA 驱动时可能会造成局部应力集中,因此需要进行折中考虑。比如,可以适当增大柔性偏转极头的圆柱直径,提高柔性偏转极头的刚度,从而提高偏转器的谐振频率。

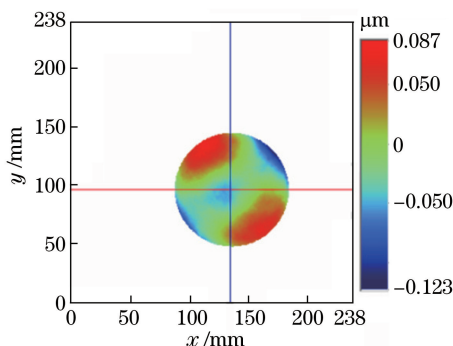


图 3 镜面面形测试图

Fig. 3 Test chart of mirror surface

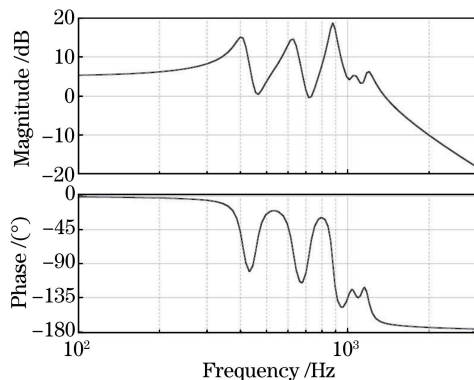


图 4 压电光学偏转器频率响应曲线

Fig. 4 Frequency response curve of piezoelectric optical deflector

2.2 紧凑型应变式压电驱动器的设计原理

偏转器内部集成了两个基于三角放大原理的紧凑型应变反馈式压电驱动器,用于实现对镜面的驱动和对偏转角位移的间接测量。紧凑型应变反馈式压电驱动器的详细设计参见文献[11],其基本结构示意图如图 5 所示。图 6 显示了位移放大的原理,当 PA 沿着竖直方向伸长或者缩短一个位移量 Y ,水平方向上会产生一个位移输出量 X 。根据图中的几何约束关系,其位移放大倍数 A 满足如下关系:

$$A = \frac{X}{Y} = \frac{\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin\alpha}{\cos\alpha - \cos(\alpha + \Delta\alpha)} \approx \cot\alpha, \quad (1)$$

式中, α 为斜边与竖直方向的夹角, $\Delta\alpha$ 为 α 的变化量,可以看出位移放大倍数主要由夹角 α 决定。该夹角设计为 18° ,理论放大倍数应该为 3.08 倍。三角放大机构采用了机械性能优越的硬铝合金(LY12),并采用箔式应变片(KFR-02-120-C1-23, KYOWA, 日本),温度系数与弹性体的温度系数相匹配。输入电压驱动压电陶瓷伸长或者缩短,使得位移放大机构产生弹性变形,最终被粘贴在横向部位的应变片所感知,再通过电桥放大与滤波电路进行处理,最终经实验测定,驱动器的实际位移放大倍数为 2.70,与理论放大倍数之间的误差一方面是由材料的力学性能、加工误差、应变片粘贴误差、应变片温度误差、电路噪声等引起的,另一方面是因为理论放大倍数的计算没有考虑该结构中部两个侧壁的影响。总之,该误差处于可接受的范围内。

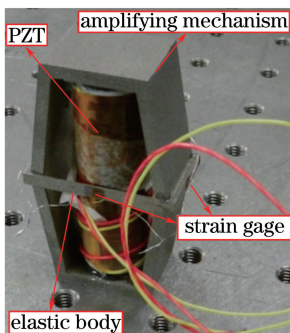


图 5 应变反馈式压电驱动器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the strain feedback type PA

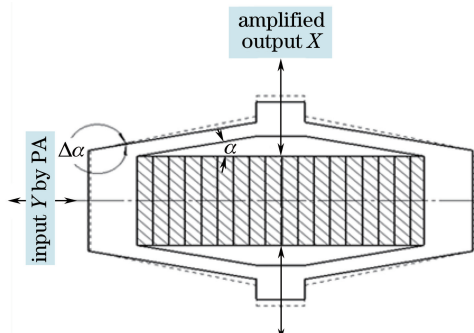


图 6 设计的压电驱动器的位移放大原理示意图

Fig. 6 Diagram of displacement amplification principle of designed PA

3 实验与结果分析

3.1 开环测试实验

为了检验压电光学偏转器的开环偏转性能,首先对设计的压电光学偏转器的应变输出进行标定实验。实验设备主要包括压电光学偏转器、信号发生器、压电驱动高压电源、自准直仪、数据采集卡、工控机等。信号发生器输出一定波形的电压,经压电驱动高压电源放大后用来驱动压电偏摆器,偏摆器的偏转角由自准直仪测得并输出对应的电压值,同时偏摆器内置的应变传感器也输出一定的电压值,这两种电压信号均由数据采集卡读取并在上位机上进行处理。应变传感器的输出经比例缩放后得到图7所示的标定曲线,该缩放比例记为标定系数。在实验中,将标准差的3倍视为压电光学偏转器的输出角偏转精度,最终确定偏转精度为 $0.05'$ 。

首先,进行恒定角位移定位实验,信号发生器输出3V的恒定电压,经压电驱动高压电源放大100倍后驱动偏转器实现偏转动作,输出角位移随时间的变化关系如图8所示。可以观察在长达30min的时间内镜面的角度出现漂移,这主要是由压电材料的蠕变^[16-17]特性造成的,蠕变值大约为12.60%。

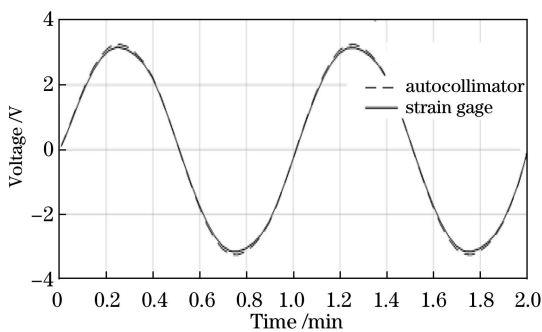


图7 压电光学偏转器输出角标定实验

Fig. 7 Output angle calibration experiment of piezoelectric optical deflector

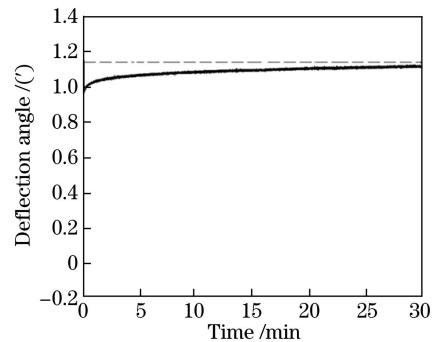


图8 开环模式下恒定角位移随时间的变化

Fig. 8 Change of constant angle displacement with time in open loop mode

然后,进行变幅值三角波的偏转跟踪实验,当给定如图9(a)所示的期望角位移信号后,经过简单换算得到驱动电压,使得偏转器实现偏转动作,偏转器的转角输出值及误差,如图9(a)所示。结果表明,对变幅值三角波信号的最大跟踪误差为 $0.17'$,占参考跟踪量程的13.70%,开环条件下的平均迟滞值约为8.80%,如图9(b)所示。一般认为,电压和转角之间存在的这种严重的迟滞现象是由压电材料的迟滞等非线性特性造成的。如果没有迟滞蠕变等非线性的存在,压电光学偏转器的输入电压和输出转角之间应近似为线性关系,因此需要对这种非线性进行补偿处理。

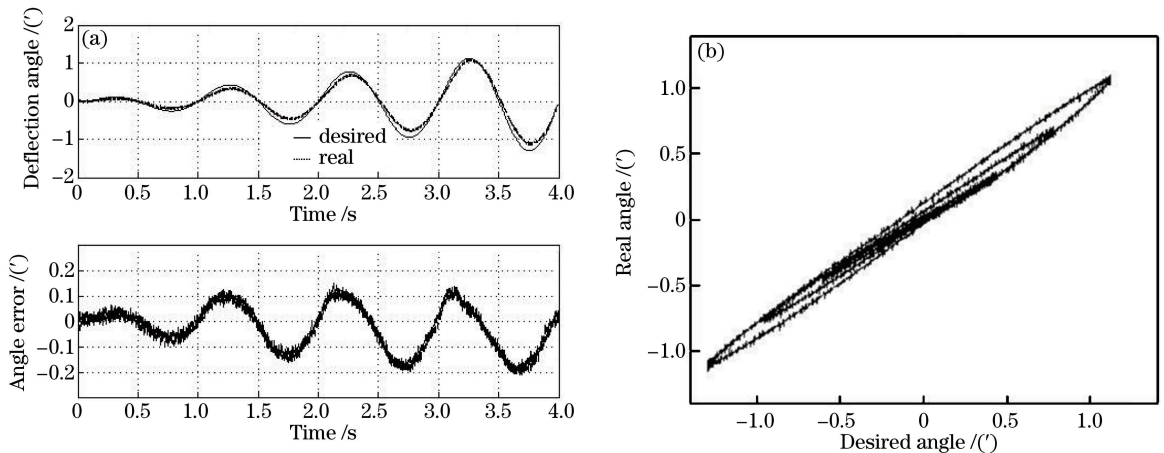


图9 开环角位移跟踪实验。(a)输出偏转角的期望值、实际值及其误差;(b)光学偏转器开环迟滞曲线

Fig. 9 Open-loop angle tracking experiment. (a) Desired value, actual value and error of output deflection angle; (b) open loop hysteresis curves of optical deflector

3.2 闭环实验系统

上一节得知压电光学偏转器开环性能不是很理想,这一节搭建闭环实验控制平台,用来实现对该偏转器的闭环性能测试。整个实验系统包括气动隔振平台(ZDT18-12)、主控计算机、数据采集卡(NI PCI-6221)、应变反馈式压电驱动电源、光学偏转器、自准直仪(TA 150-38)。此处所使用的应变反馈式压电驱动电源由中科院光电所研制,主要用于对应变信号进行放大和滤波处理,同时对控制信号进行高压放大后以驱动压电陶瓷产生机械运动,图 10 给出相应的实验装置,图 11 显示实验系统的原理。给定光学偏转器的参考偏转信号,然后由控制计算机发出,并执行内部小闭环的控制算法使得光学偏转器的输出偏转角能够跟踪参考偏转信号。自准直仪的作用是监测偏转信号,小闭环的作用是对压电材料输入输出之间的迟滞^[18]蠕变等非线性现象进行校正。

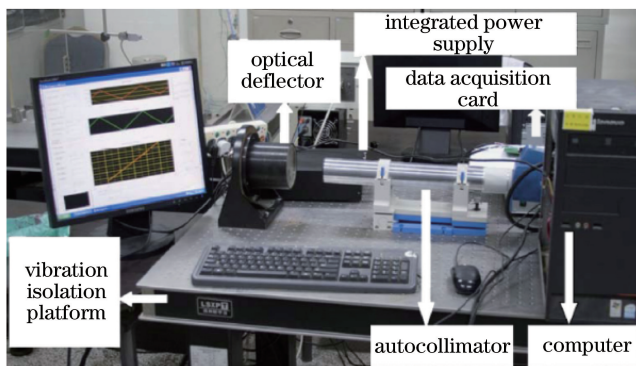


图 10 实验系统实物图

Fig. 10 Experiment setup

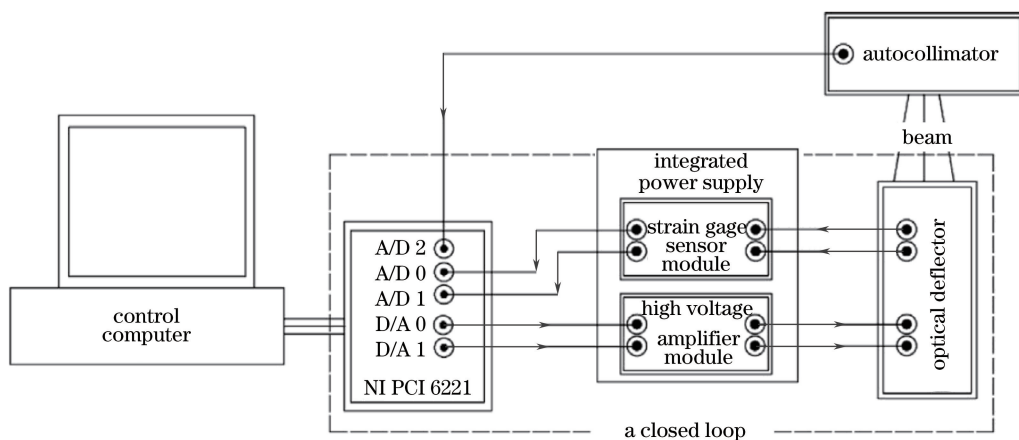


图 11 实验系统原理图

Fig. 11 Schematic diagram of experimental system

3.3 闭环测试实验

进一步验证所设计的压电光学偏转器在闭环模式下具有更好的性能,基于上述实验平台设计了偏转器输出转角的定位与跟踪实验。此时,偏转器工作在闭环模式,内部小闭环执行设定的非线性控制算法。与 3.1 小节的开环效果进行对比,闭环模式下光学偏转器的输出输入关系能够达到不错的性能,蠕变漂移现象和迟滞现象均得到有效地抑制。

检验光学偏转器的准静态定位性能,进行一个长达 30 min 的角度定位实验,参考定位角是 $1.15'$ 。图 12 给出闭环工作模式下,压电光学偏转器的输出转角在恒定电压输入下的实验结果。在初始时刻有 0.6% 的超调量,在 0.15 s 之后基本处于一个稳定值,输入偏转角随时间的延长并没有出现蠕变漂移现象。这是由于闭环反馈控制作用的存在,消除了蠕变非线性的影响,使得其可以应用于长时间定位的领域。

然后,检验在闭环模式下偏转器的变幅值三角波偏转性能。在闭环模式下内部小闭环起作用,采用基于

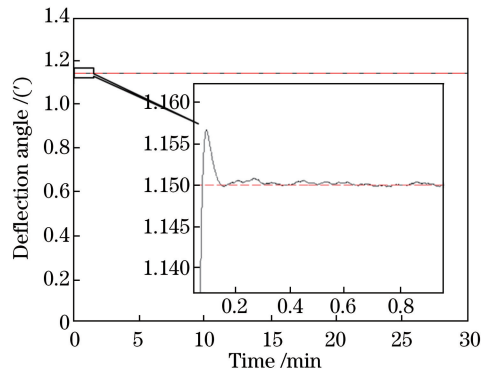


图 12 闭环模式下恒定角位移定位实验及其局部视图

Fig. 12 Constant angle positioning experiment and local enlarged view in closed loop mode

改进的非对称 PI(Prandtl-Ishlinskii)逆模型的复合控制算法^[19],来对光学偏转器的转角进行跟踪控制实验,实验效果如图 13 所示。此次实验中,所跟踪的参考信号是相同的变幅值三角波,最大误差不超过 $0.07'$,约为参考跟踪量程的 4.31% ,闭环条件下迟滞的平均值达到 1.00% 。基于上述实验结果,可以认为光学偏转器在闭环控制器的作用下,其输入电压和输出转角之间存在的迟滞非线性已被补偿,满足实际的工程应用。

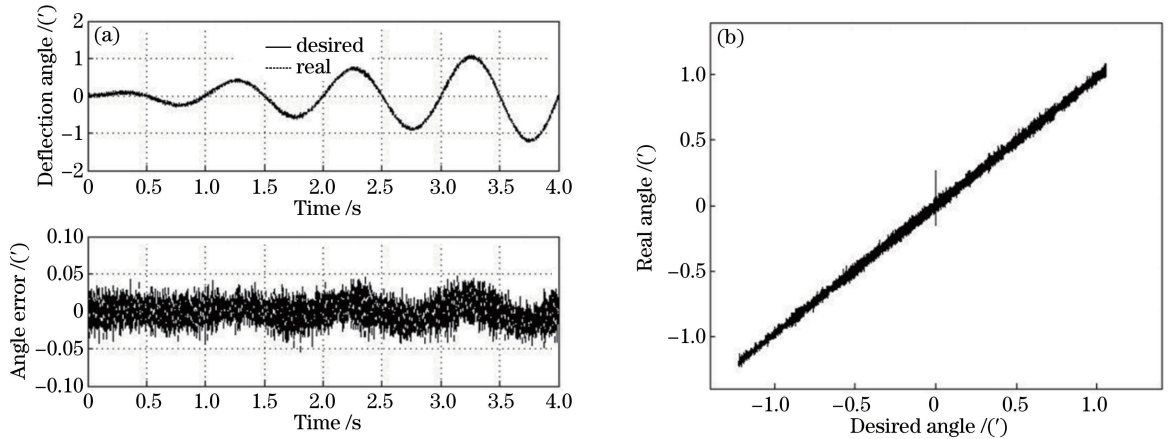


图 13 闭环模式下角位移跟踪实验。(a)输出偏转角的期望值、实际值及其误差;(b)光学偏转器闭环迟滞曲线

Fig. 13 Closed-loop angle tracking experiment. (a) Desired value, actual value and error of output deflection angle; (b) hysteresis curves of optical deflector

4 结 论

为了提高压电倾斜镜的定位跟踪性能,本文设计了一个紧凑型光学偏转器来对目前的压电倾斜镜内部结构进行改进。首先,设计机械结构并加入紧凑型应变式压电驱动器,在狭小空间内实现位移信号的输出。然后,测试镜面光学面形并加工组装了一个紧凑型压电光学偏转器,同时测试频率响应特性。最后,基于非线性控制算法,设计一系列开闭环定位实验与跟踪实验。结果表明:在开环模式下,恒定值定位有较大的蠕变现象,三角波跟踪有不小的偏转误差;在闭环模式下,蠕变基本得到消除可以实现较好的定位效果,对变幅值三角波的跟踪误差大幅减小。设计的集成式压电光学偏转器能够实现较好的定位并具有较好的跟踪性能,稳定可靠,具有重要的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yang Dong, Mao Yao, Ding Ke, *et al.* Application of model reference adaptive algorithm in the fast steering-mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2790-2795.

杨 东, 毛 耀, 丁 科, 等. 模型参考算法在快速反射镜中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10): 2790-2795.

- [2] Chen W, Chen S H, Luo D, *et al.* A compact two-dimensional laser scanner based on piezoelectric actuators[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(1): 013102.
- [3] Liu L, Zhao Y B, Tang L, *et al.* Modeling and identification investigation of multi-field hysteretic dynamics in flexure-guided piezo platform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 50-51: 594-606.
- [4] Wang Geng, Fan Lei, Zhou Hong. Current status and future development of precision tracking control technology of piezoelectric fast steering mirror[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2016, 38(1): 5-10.
王 耿, 樊 磊, 周 虹. 压电倾斜镜精密跟踪控制技术研究现状与发展[J]. 压电与声光, 2016, 38(1): 5-10.
- [5] Sun Lining, Sun Shaoyun, Qu Dongsheng, *et al.* Micro-drive positioning systems based on PZT and its control[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(1): 55-59.
孙立宁, 孙绍云, 曲东升, 等. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(1): 55-59.
- [6] Tian Yanling, Zhang Dawei, Yan Bing. Development of a 2-DOF micropositioning table[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 94-99.
田延岭, 张大卫, 闫 兵. 二自由度微定位平台的研制[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(1): 94-99.
- [7] Fan Wei, Yu Xiaofen, Xi Lin. Research on driving system and controlling means of PZT[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3): 368-371.
范 伟, 余晓芬, 奚 琳. 压电陶瓷驱动系统及控制方法研究[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(3): 368-371.
- [8] Yang Zhigang, Liu Dengyun, Wu Liping, *et al.* Micro-displacement magnifying mechanism used in piezo-stack pump [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(6): 884-888.
杨志刚, 刘登云, 吴丽萍, 等. 应用于压电叠堆泵的微位移放大机构[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(6): 884-888.
- [9] Liu L, Tan K K, Chen S L, *et al.* Discrete composite control of piezoelectric actuators for high-speed and precision scanning. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 859-868.
- [10] Park J H, Lee H S, Lee J H, *et al.* Design of a piezoelectric-driven tilt mirror for a fast laser scanner[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51: 09MD14.
- [11] Wang Geng, Guan Chunlin, Zhang Xiaojun, *et al.* Design and control of miniature piezoelectric actuator based on strain gauge sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 709-716.
王 耿, 官春林, 张小军, 等. 应变式微型精密压电驱动器的一体化设计及其 PID 控制[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 709-716.
- [12] Zhou Rui, Li Xinyang, Shen Feng, *et al.* Laser beam stabilizing system based on close loop control of two fast steering mirrors in series[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1214002.
周 睿, 李新阳, 沈 锋, 等. 基于两级高速倾斜镜闭环控制的光束稳定技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1214002.
- [13] Xiang Sihua, Chen Sihai, Wu Xin, *et al.* Study and test on a novel fast laser scanner based on piezo-actuators[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 408-413.
向思桦, 陈四海, 吴 鑫, 等. 一种基于压电驱动器的新型高速激光扫描器的研制和测试[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 408-413.
- [14] Li Chaohong, Xian Hao, Jiang Wenhan, *et al.* Field-of-view shifted shack-hartmann wavefront sensor for daytime adaptive optics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(2): 22.
李超宏, 鲜 浩, 姜文汉, 等. 用于白天自适应光学的视场偏移哈特曼波前传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(2): 22.
- [15] Zhang Hao, Yan Feng, Wei Haisong, *et al.* Error analysis of scanning Hartmann wavefront testing technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111203.
张 昊, 闫 锋, 魏海松, 等. 扫描哈特曼波前检测技术的误差分析研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111203.
- [16] Fan Wei, Yu Xiaofen. Study on PZT actuator creep characteristics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1383-1386.
范 伟, 余晓芬. 压电陶瓷驱动器蠕变特性的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1383-1386.
- [17] Zhao Xueliang, Zhang Chenjin, Gu Jianjun, *et al.* Creep characteristics of stack piezoactuator effected by discretized

sine voltage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 942-948.

赵学良, 张承进, 顾建军, 等. 离散化正弦电压作用下的压电驱动器蠕变特性[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 942-948.

- [18] Wang Chongchong, Hu Lifa, He Bin, *et al.* Hysteresis compensation method of piezoelectric steering mirror based on neural network[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1113001.

王冲冲, 胡立发, 何 斌, 等. 基于神经网络的压电倾斜镜磁滞补偿方法研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1113001.

- [19] Wang G, Chen G Q, Zhou H, *et al.* Modeling and tracking control for piezoelectric actuator based on a new asymmetric hysteresis model[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, 3(99): 1-10.