

文章编号 1004-924X(2025)19-3070-08

基于输入整形的单压电变形镜振动抑制

李 艳¹, 葛鑫磊¹, 张捷艇¹, 马剑强^{1*}, 娄军强¹, 马文超², 杨海波^{2*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300308)

摘要:为了抑制单压电变形镜在工作中镜面产生的振动,提出了基于输入整形的单压电变形镜振动抑制方法。通过对单压电变形镜的结构进行分析,搭建单压电变形镜的动力学模型。利用软件仿真分析输入整形器对单压电变形镜阶跃响应曲线中位移超调量和调整时间的影响,再搭建实验平台进行验证。最后,通过对变形镜重构离焦面形的仿真,分析整形技术在变形镜实际控制中的抑振效果。实验结果表明,在 5 kHz 的控制频率下采用输入整形器后,单压电变形镜的位移超调量从 32.1% 下降至几乎为 0,调整时间由 4.30 ms 缩短至 0.57 ms。此外,在变形镜重构仿真过程中超调量从 34% 下降至 1% 以内,调整时间由 3.95 ms 缩短至 0.58 ms,提高了变形镜的控制速度和精度。所设计的输入整形器可有效抑制单压电变形镜的振动。

关键词:单压电变形镜;输入整形;振动抑制;自适应光学系统

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253319.3070

CSTR:32169.14.OPE.20253319.3070

Vibration suppression of unimorph deformable mirror based on input shaping

LI Yan¹, GE Xinlei¹, ZHANG Jieting¹, MA Jianqiang^{1*}, LOU Junqiang¹,
MA Wenchao², YANG Haibo^{2*}

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. National State Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China)

* Corresponding author, E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn; yhb_5353@163.com

Abstract: An input-shaping – based vibration suppression control method is proposed to mitigate mirror vibrations of a unimorph deformable mirror during operation. The mirror's structural characteristics were analyzed to develop a dynamic model. The effects of input shapers on step-response characteristics (displacement overshoot and settling time) were then simulated. An experimental platform was constructed to validate the simulation results. Finally, the influence of the shaping technique on control performance was assessed via defocus wavefront reconstruction simulations. At a control frequency of 5 000 Hz, application of the input shaper reduced displacement overshoot from 32.1% to nearly zero and shortened settling time from 4.30 ms to 0.57 ms. In wavefront reconstruction simulations, overshoot decreased from 34% to less

收稿日期:2025-06-16;修订日期:2025-07-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 5247051023, No. U23A20618);电磁空间安全全国重点实验室基金资助项目(No. JCKY2024240C009)

than 1%, while settling time improved from 3.95 ms to 0.58 ms, substantially enhancing both response speed and control accuracy. The designed input shaper is shown to effectively suppress vibrations of unimorph deformable mirrors.

Key words: unimorph deformable mirror; input shaping; vibration suppression; adaptive optics system

1 引 言

单压电变形镜作为一种波前校正器,具有结构简单、成本较低、变形量大等优点,在自适应光学领域中受到广泛青睐^[1-2]。然而,单压电变形镜的谐振频率较低,在高速控制下会产生较大的镜面振动,这种镜面振动会直接影响闭环控制的精度。为了抑制振荡,通常需要降低变形镜比例环节系数进行闭环控制^[3],也可在控制器中采用低通滤波器或双二阶滤波器的方法来抑制振动^[4-5],但这些方法均会影响自适应光学系统的工作带宽,限制其应用。

输入整形技术是一种利用一系列脉冲信号对输入信号进行整形的开环控制策略,旨在抑制系统振动^[6-7]。该技术最早由 Smith 教授提出^[8-9],它将一个特定振幅的阶跃信号分割成两个较小幅度的阶跃信号并依次输入到控制系统中,从而有效消除系统的残余振动。之后, Singer 等^[10]在输入整形器中加入一阶微分约束,得到了零振动微分输入整形器 (Zero Vibration and Derivative Shaper, ZVD),提高了系统的稳定性。输入整形技术在压电器件控制领域获得诸多应用,如压电显微镜镜头^[11]、压电扫描器^[12]、压电梁致动器^[13],可有效抑制振动。Hao 等^[9]将输入整形方法应用于压电显微镜系统,有效地消除了压电显微镜镜头的振动,提升了压电显微镜系统的采集速度,改善了压电显微镜系统的自动对焦能力。Zhang 等^[10]提出了一种集成闭环反馈和输入整形方法的混合控制系统,并克服压电扫描系统中的滞后和动态行为问题,提高了半导体激光器的扫描速度。Luo 等^[11]提出了一种输入整形技术与自动抗扰控制器相结合的混合振动控制器,抑制了压电机机械手产生的振动,提高了系统的控制精度。Nie 等^[12]利用输入整形方法消除了压电梁致动器在阶跃信号作用下产生的振荡,提高了系统的性能。

虽然输入整形技术在压电器件控制方面有许多应用,但其在压电变形镜中应用的相关研究还未报道。因此,本文将输入整形技术引入到变形镜控制领域,并针对变形镜定频控制特点设计了适用于单压电变形镜的整形器,实现了对单压电变形镜的振动抑制。

2 单压电变形镜结构建模

单压电变形镜的结构如图 1 所示,它由硅镜面和压电驱动层组成,四周采用固定支撑^[14]。压电层内侧导电层接地,外侧被分割成电极阵列以形成致动器阵列,每个致动器均可独立工作。通过每个致动器产生不同的位移使得镜面发生变形校正波前像差。

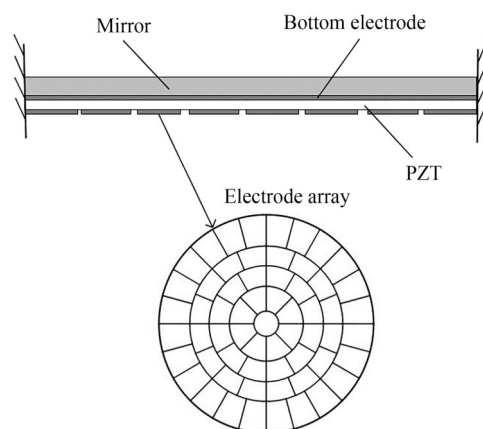


图 1 单压电变形镜结构

Fig. 1 Structure of unimorph deformable mirror

由图 1 可知,单压电变形镜的镜面可以视为一个圆片薄板结构,其动力学模型可近似为一个二阶系统,使用二阶系统的模型来描述镜面的动态响应。该系统的模型可表示为:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (1)$$

式中:输入为致动器产生的位移,输出为镜面中

心的位移, ω_n 表示单压电变形镜的固有频率, ξ 表示阻尼比。

3 单压电变形镜输入整形器设计

3.1 单压电变形镜输入整形器模型

结合变形镜高速控制的特点, 这里选择 ZVD 整形器进行控制, 其优点是只有三路脉冲, 具有较短的时滞, 并且第三路脉冲考虑到微分方程的约束, 系统的稳定性较强。ZVD 整形器原理如图 2 所示, 相当于引入了一个前馈环节到控制系统中, 根据系统的动态特性进行设计, 并计算出不同幅值和时滞的三路脉冲序列。将计算得到的脉冲序列信号与输入信号进行卷积, 得到整形后的信号, 通过该方法可抑制单压电变形镜在高速控制中产生的振动^[15-16]。

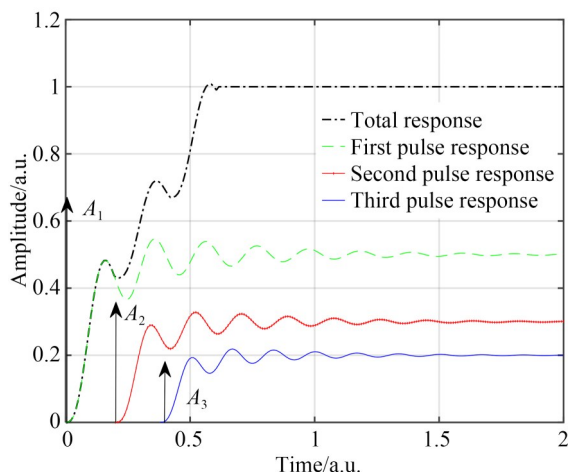


图 2 输入整形原理

Fig. 2 Principle for input shaping

ZVD 整形器的核心在于计算出 3 个脉冲信号的幅值和时滞。ZVD 整形器的数学表示为:

$$C(s) = \sum_{i=1}^3 A_i e^{-t_i s}, \quad (2)$$

其中: $A_i (i=1, 2, 3)$ 为第 i 个脉冲幅值, t_i 为第 i 个脉冲的时滞。

根据单压电变形镜的系统模型可知, 其单位

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ t_1 & t_2 & t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{2K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_d} & \frac{2\pi}{\omega_d} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

脉冲响应可表达为:

$$y_i(t) = \frac{A_i \omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega_n (t-t_i)} \sin \omega_d (t-t_i). \quad (3)$$

系统的脉冲响应等于所有的脉冲响应之和, 并利用三角函数的性质对式(3)进行变形, 得到:

$$y(t) = \sum_{i=1}^3 y_i(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t - \phi) \cdot \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi \omega_n t_i} \cos \omega_d t_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi \omega_n t_i} \sin \omega_d t_i \right)^2}, \quad (4)$$

$$\text{其中 } \phi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi \omega_n t_i} \sin \omega_d t_i}{\sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi \omega_n t_i} \cos \omega_d t_i}.$$

为消除系统响应的残余振动, 令 $y(t)=0$, 即:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi \omega_n t_i} \cos \omega_d t_i = 0 \\ \sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi \omega_n t_i} \sin \omega_d t_i = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

为了增强输入整形器的稳定性, 令固有频率 ω_n 的一阶导数为 0, 可得:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 A_i t_i e^{\xi \omega_n t_i} \cos \omega_d t_i = 0 \\ \sum_{i=1}^3 A_i t_i e^{\xi \omega_n t_i} \sin \omega_d t_i = 0 \end{cases}. \quad (6)$$

因为脉冲序列的时滞越短, 系统所响应的的时间就越短, 所以为提高系统的响应速度, 令第一个脉冲从 0 时刻开始作用。为确保输入整形前后系统输出的稳态值不变, 脉冲幅值 A_i 需满足归一化条件:

$$\begin{cases} t_1 = 0 \\ \sum_{i=1}^3 A_i = 1 \end{cases}. \quad (7)$$

将约束条件式(7)带入式(6)可求出 ZVD 整形器 3 个脉冲信号的幅值和时滞:

其中 $K = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$ 。

在变形镜实际的控制系统中,控制信号常为定频的离散信号,根据输入整形器原理所计算的理论脉冲时滞 t 可能并非变形镜控制周期的整数倍,若直接使用输入整形器的理论值进行整形输入,则会影响变形镜的振动抑制效果。因此,在实际应用中,需要对输入整形器进行离散化,令时滞 t_i 为系统控制周期 T_c 的整数倍:

$$t_i = n_i T_c. \quad (9)$$

输入整形器的时滞被离散化后,原先求解得到的脉冲幅值就不是最优解,可能会使整形后的振动加剧。为了直观比较整形前后的残余振动情况以及求解最优的脉冲幅值,定义系统响应脉冲和整形器输入脉冲的幅值之比为系统的残余振荡百分比,以最小的残余振荡百分比作为参考指标,从而来选择时滞离散化后的最优幅值 A_1, A_2, A_3 。残余振荡百分比的表达式为:

$$V(\xi, \omega_n) = e^{-\xi\omega_n t_n} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi\omega_n t_i} \cos \omega_d t_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 A_i e^{\xi\omega_n t_i} \sin \omega_d t_i\right)^2}. \quad (10)$$

3.2 单压电变形镜整形器优化

为了验证输入整形器离散化后的振动抑制效果,利用单压电变形镜模态参数,构建了一个单输入单输出的仿真模型。在仿真模型中,只关注系统的残余振动情况,不考虑系统的增益。通过对单压电变形镜进行扫频和计算,得到单压电变形镜的一阶固有频率 $f_n = 1\,855\text{ Hz}$ (对应角频率 $\omega_n = 11\,655\text{ rad/s}$), 阻尼比 $\xi = 0.04$ 。将上述数据代入式(8)计算得到 ZVD 整形器的理论参数,如表 1 所示。

表 1 整形器理论参数

Tab. 1 Theoretical parameters of shaper

Pulse sequence	Amplitude/a. u.	Lag/ms
Pulse 1	0.28	0.00
Pulse 2	0.50	0.27
Pulse 3	0.22	0.54

该变形镜驱动电源的工作频率为 5 kHz,为满足控制需求,故仿真实验控制频率为 5 kHz。在此频率下对输入整形器的时滞做离散化处理,将整形器的脉冲时滞由表 1 的理论时滞参数乘以控制频率并取整。其优化后的脉冲幅值通过 MATLAB 优化工具箱中的非线性规划求解器求解得到。优化前后整形器的脉冲幅值和时滞参数如表 2 所示。

将期望的阶跃信号与上表参数对应的脉冲信号进行卷积运算,将整形后的信号作为仿真的输入,对优化前后 ZVD 整形器的振动抑制效果进行比较和分析。其中,超调量是衡量系统抑振性能的重要指标之一,较大的超调量表明在镜面

表 2 5 kHz 输出频率下各输入整形器参数

Tab. 2 Input shaper parameters at output frequency of 5 kHz

Shaping device	Pre-optimization	Post-optimization	Lag /ms
Pulse 1	0.28	0.32	0.0
Pulse 2	0.50	0.41	0.2
Pulse 3	0.22	0.27	0.4

中心点会瞬间出现较大的变形,从而影响单压电变形镜的使用寿命。另一个重要的性能指标为调整时间,它指时滞响应曲线达到并保持在允许误差 ($\pm 5\%$) 内的最短时间,调整时间越短表明单压电变形镜系统的响应速度越快。因此,超调量和调整时间能直接反映输入整形器对单压电变形镜振动的抑制能力。

由图 3 可知,在 5 kHz 频率下,不加入任何整

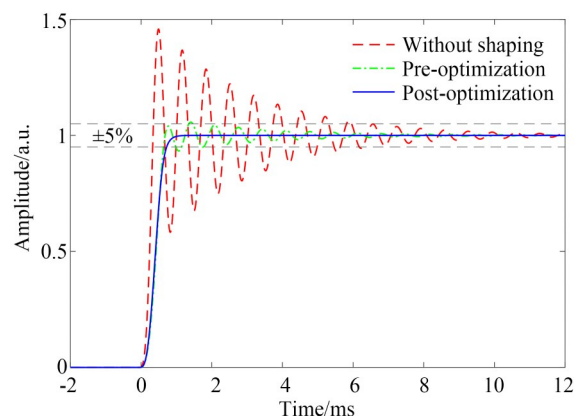


图 3 振动抑制效果

Fig. 3 Vibration suppression effect

形器的阶跃信号最大超调量为 45.8%,调整时间为 6.30 ms;在加入整形器后,最大超调量明显降低,振动得到了有效抑制。此外,振动消除时间明显降低,提高了系统的响应速度。优化后的 ZVD 整形器相比于优化前的 ZVD 整形器,最大超调量由 6.7% 下降到 0,调整时间由 1.80 ms 下降到 0.67 ms,因此,在仿真中优化后的 ZVD 整形器振动抑制效果优于优化前的 ZVD 整形器,振动得到明显的抑制,由此验证了离散定频 ZVD 整形器的有效性。如果将工作频率换成其他频率,也需要对输入整形器参数进行响应优化。

4 振动抑制实验

为了验证输入整形器对单压电变形镜抑振的有效性,搭建单压电变形镜振动抑制系统实验平台,如图 4 所示。先通过工控机将驱动电压进行整形,再将整形后的信号发送给实时目标机转化为模拟电压信号,同时输入到功率放大器 1 和 2 中,并施加到单压电变形镜上,最后用多普勒激光测振仪采集镜面中心点的振动位移信号。

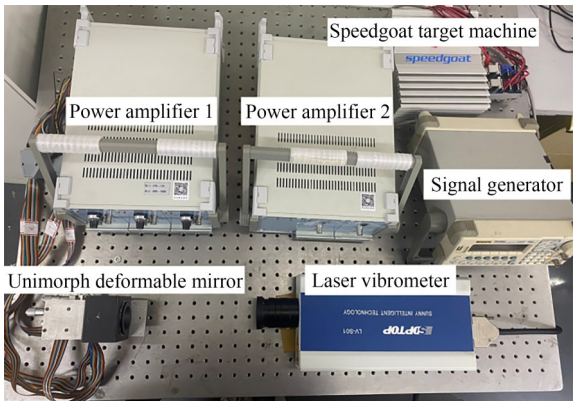


图 4 单压电变形镜振动抑制实验平台
Fig. 4 Single-piezoelectric deformable mirror vibration suppression experimental platform

在单压电变形镜控制过程中,通过电压与面形的关系矩阵计算出每个致动器所需要的电压信号,再分别采用优化前的 ZVD 整形器和优化后的 ZVD 整形器计算得到各路致动器的整形电压信号,并施加到每个致动器上。其

中,在振动抑制实验中,中心制动器位于镜面的中心位置,最能反映变形镜的振动情况,故选择中心制动器的电压信号进行分析,其 5 kHz 控制频率下输入整形后的驱动信号如图 5 所示。

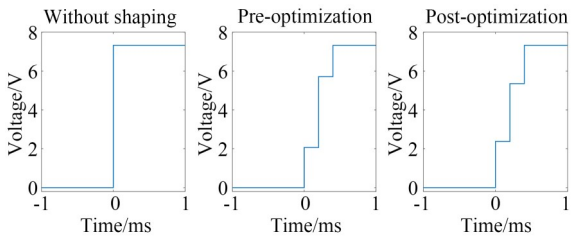


图 5 5 kHz 控制频率下输入整形后的驱动信号
Fig. 5 Drive signal after input shaping at control frequency of 5 kHz

将得到的驱动信号施加到单压电变形镜上进行振动抑制实验。用多普勒激光测振仪采集镜面中心点的振动位移信号。镜面中心点的振动可以代表镜面整体的振动。镜面中心点位移如图 6 所示,无整形器的阶跃响应曲线最大超调量为 32.1%,调整时间为 4.30 ms。在 5 kHz 的控制频率下,优化前的 ZVD 整形器最大超调量为 7.4%,但存在较长时间的振荡,调整时间为 1.50 ms;优化后的 ZVD 整形器超调大幅抑制,振荡小于 1%,调整时间为 0.57 ms。结果表明,优化后 ZVD 整形器有效抑制了单压电变形镜的振动。

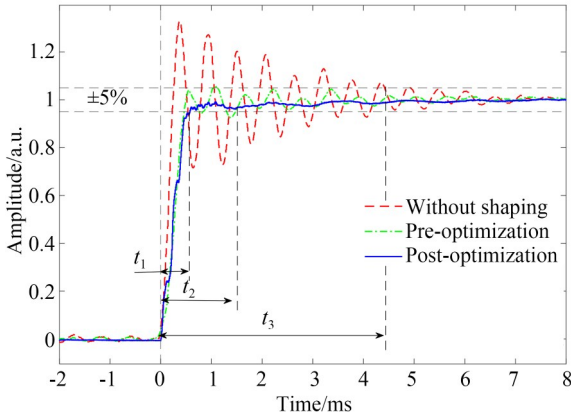


图 6 控制频率 5 kHz 下变形镜的阶跃响应
Fig. 6 Step response of deformable mirror at control frequency of 5 kHz

5 基于输入整形的单压电变形镜控制

上述实验验证了输入整形技术能有效抑制单个制动器的振动。为了分析输入整形技术能否抑制变形镜在波前校正控制中的振动,可以通过变形镜控制过程中所引起的波前响应变化来分析变形镜的控制性能。在自适应光学系统中,通常以 Zernike 多项式来描述变形镜的表面形态和波前信息,电压与变形镜的变形关系也可以用 Zernike 多项式进行表达,将各个致动器对应的 Zernike 系数保存在影响函数矩阵 B 中,则得到镜面形变 a 与致动器电压 v 之间的关系为^[17-19]:

$$a = Bv, \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & O & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中: n 是致动器的数目, v 代表着致动器的电压向量, m 代表 Zernike 多项式的阶数。影响函数矩阵 B 代表了变形镜的各致动器的电压-波前变形响应信息。变形镜的控制电压向量可通过计算影响函数矩阵 B 的伪逆后求得:

$$v = B^{-1}a. \quad (12)$$

为了消除变形镜振动,进一步将变形镜控制电压向量通过输入整形器求解后得到整形后的驱动信号 a' ,如图 7 所示。

由于变形镜面形振动测量需要超高速波前传感器(测量 2 kHz 的振动至少 10 kHz 的采样频率),目前尚不具备该条件,因此通过 MATLAB/Simulink 对该实验进行仿真。设置离焦面形作为目标面形,通过实验测量得到影响函数求解出各致动器的电压,利用输入整形器对求解后的驱动信号进行整形。由图 7 可知,无整形器响应曲线的最大超调量为 34%,调整时间为 3.95 ms;而采用输入整形器的响应曲线几乎没有超调量,调整时间为 0.58 ms。通过对比可知,输入整形技术能有效抑制单压电变形镜的振动,并提高其重构性能,使该变形镜在控制过程中更快更精确地到达目标面形。如果将变形镜面形拓展至其他面形上,理论也能保持一定的振动抑制效果。

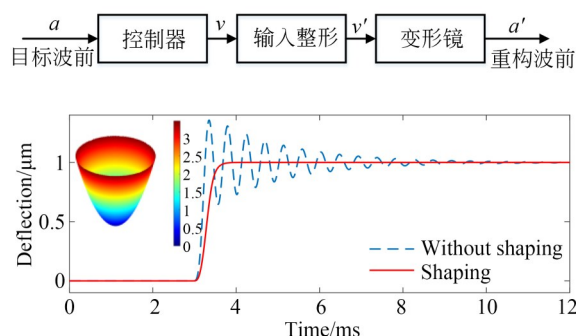


图 7 变形镜面形重构响应

Fig. 7 Reconstruction response of deformable mirror shape

6 结 论

本文针对单压电变形镜在高速控制中的振动抑制问题,提出了离散定频 ZVD 整形器的控制方法。根据单压电变形镜的系统模型,对控制时间进行离散化,设置残余振荡百分比为目标函数,对脉冲幅值和时滞进行优化计算,以达到减小残余振动的目的,通过实验验证了该方法的有效性。实验结果表明,在使用该方法后,单压电变形镜的最大超调量从 32.1% 降到 1% 以内,调整时间由 4.30 ms 缩短至 0.57 ms。通过变形镜的重构控制仿真实验,使得最大超调量从 34% 降到 1% 以内,调整时间缩短至 0.58 ms,极大缓解了重构过程中变形镜的振动,提高了变形镜的控制速度和精度,说明该方法适用于单压电变形镜的振动控制。本文所述的控制方法不仅实现了单压电变形镜在定频下的抑制振动,也同样适用于静电薄膜式变形镜、电磁式变形镜等谐振频率较低的变形镜,拓展了它在高频自适应光学系统中的应用。

作者贡献声明:

李艳:实验设计,论文构思和撰写;
葛鑫磊:实验数据处理;
张捷艇:模型建立与实验设计;
马剑强:方案提出,实验和论文指导;
姜军强:实验方案指导;
马文超:实验方法讨论;
杨海波:论文指导与审核。

参考文献:

- [1] 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489.
JIANG W H. Overview of adaptive optics development[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170489. (in Chinese)
- [2] WANG S Q, WEI K, ZHENG W J, *et al.* First light on an adaptive optics system using a non-modulation pyramid wavefront sensor for a 1.8 m telescope[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(10): 5-9.
- [3] 范占斌, 戴一帆, 铁贵鹏, 等. 横向压电驱动变形镜的迟滞特性及其闭环校正[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 261-266.
FAN ZH B, DAI Y F, TIE G P, *et al.* Hysteresis characteristics and closed loop correction of unimorph deformable mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 261-266. (in Chinese)
- [4] 李新阳, 凌宁, 陈东红, 等. 自适应光学系统中高速倾斜反射镜的稳定控制[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(1): 31-36.
LI X Y, LING N, CHEN D H, *et al.* Stable control of the fast steering mirror in adaptive optics system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(1): 31-36. (in Chinese)
- [5] 黄林海, 凡木文, 周睿, 等. 大口径压电倾斜镜模型辨识与控制[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 95-103.
HUANG L H, FAN M W, ZHOU R, *et al.* System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 95-103. (in Chinese)
- [6] 易群, 李彩丽. 机械振动主动控制技术的现状和发展趋势[J]. 机械工程与自动化, 2016(3): 220-221.
YI Q, LI C L. Research status and development trend of active control technology of mechanical vibration[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2016(3): 220-221. (in Chinese)
- [7] ENGELBERG S. Input shaping: a tutorial introduction lecture notes[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2021, 41(2): 45-51.
- [8] 刘德馨, 张建成, 李媛, 等. 采摘机械臂自适应输入整形控制研究[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(6): 1043-1050.
LIU D X, ZHANG J C H, LI Y, *et al.* Research on adaptive input shaping control of fruits and vegetable harvesting robot arm[J]. *Control Theory & Applications*, 2022, 39(6): 1043-1050. (in Chinese)
- [9] SMITH O J M. Posicast control of damped oscillatory systems[J]. *Proceedings of the IRE*, 1957, 45(9): 1249-1255.
- [10] SINGER N C, SEERING W P. Preshaping command inputs to reduce system vibration[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1990, 112(1): 76-82.
- [11] HAO X P, ZHONG B W, LIAO Z, *et al.* Fast autofocus method for piezoelectric microscopy system for high interaction scenes[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2023, 86(7): 773-780.
- [12] ZHANG M, LIU ZH G, ZHU Y, *et al.* Integral force feedback control with input shaping: Application to piezo-based scanning systems in ECDLs[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(7): 075006.
- [13] NIE ZH G, CUI Y G, HUANG J, *et al.* Precision open-loop control of piezoelectric actuator[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2022, 33(9): 1198-1214.
- [14] MA J Q, CHEN K, CHEN J J, *et al.* Closed-loop correction and ocular wavefronts compensation of a 62-element silicon unimorph deformable mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(4): 42201-42204.
- [15] SINGHOSE W E, PORTER L J, TUTTLE T D, *et al.* Vibration reduction using multi-hump input shapers[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1997, 119(2): 320-326.
- [16] 陈俊恒. 输入整形减振算法的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
CHEN J H. *Research and Implementation of Input Shaping Vibration Reduction Algorithm*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] 邵蒙, 李洪文, 王建立, 等. 自适应光学千单元级高压驱动系统的设计和性能分析[J]. 光学精密工程, 2023, 31(17): 2493-2504.
SHAO M, LI H W, WANG J L, *et al.* Design and performance analysis of high-voltage drive system for thousand-element adaptive optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(17): 2493-2504. (in Chinese)
- [18] 杨乐强, 王建立, 姚凯男, 等. 基于GPU的961

单元自适应光学系统波前处理器设计及其动态性能[J]. 光学精密工程, 2022, 30(23): 3004-3012.

YANG L Q, WANG J L, YAO K N, *et al.* Design and dynamic performance of wavefront processor for 961 element adaptive optics system based on GPU [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(23): 3004-3012. (in Chinese)

[19] 张天宇, 王钢, 张熙, 等. 基于焦面复制方法的自适应光学系统静态像差校正技术[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 545-551.

ZHANG T Y, WANG G, ZHANG X, *et al.* Static aberration correction technique for adaptive optics system based on focal-plane copy approach [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 545-551. (in Chinese)

作者简介:



李 艳(1992—),男,湖北咸宁人,博士研究生,主要从事变形镜控制理论方面的研究。E-mail: 943469730@qq.com

通讯作者:



杨海波(1977—),男,湖北黄石人,研究员,2003年毕业于长春理工大学,主要从事光束控制技术等方面的研究。E-mail: yhb_5353@163.com

通讯作者:



马剑强(1983—),男,浙江台州人,博士,教授,2012年于中国科学技术大学获得博士学位,研究方向为压电变形镜与自适应光学。E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn