

基于 PI 迟滞模型的单压电变形镜开环控制*

田雷¹, 陈俊杰², 崔玉国¹, 马剑强¹

(1. 宁波大学机械工程与力学学院 宁波 315211; 2. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系 合肥 230027)

摘要: 压电非线性迟滞导致压电变形镜的开环控制精度及闭环工作带宽降低, 限制了其在自适应光学系统中的应用。为克服迟滞影响, 提出采用 PI 迟滞模型描述单压电变形镜的迟滞非线性特性, 实现单压电变形镜的高精度开环控制。首先建立 PI 迟滞数学模型, 利用最小二乘法辨识 PI 迟滞模型的权值, 计算出 PI 逆模型的权值和阈值, 从而获得消除迟滞后的变形镜控制电压; 接着搭建了基于哈特曼波前传感器的自适应光学测试平台, 采用单压电变形镜的环形致动器进行离焦面形的开环控制实验。实验结果表明, 经过迟滞消除后变形镜的电压-变形迟滞由 9.3% 降低到 1.2%, 离焦面形的开环重构精度提高 70% 以上, 证明该迟滞模型可有效应用于单压电变形镜的开环控制。

关键词: 单压电变形镜; PI 迟滞模型; 开环控制; 波前校正; 离焦像差

中图分类号: O439 TH39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Open-loop control of unimorph piezoelectric deformable mirror based on PI hysteresis model

Tian Lei¹, Chen Junjie², Cui Yuguo¹, Ma Jianqiang¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Nonlinear piezoelectric hysteresis reduces the open-loop control precision and closed-loop operation bandwidth of the piezoelectric deformable mirror (DM), which limits its applications in adaptive optics (AO) system. In order to overcome the hysteresis influence of the piezoelectric deformable mirror, the PI hysteresis model was adopted to describe the nonlinear hysteresis behavior of a unimorph piezoelectric deformable mirror and achieve the high precision open-loop control of the unimorph piezoelectric deformable mirror. Firstly, the mathematical model of PI hysteresis was established. The least square method was used to identify the weight value of the PI hysteresis model. The weight value and threshold value of the PI inverse model were calculated. The control voltage of the unimorph piezoelectric deformable mirror after hysteresis elimination was obtained. Then, an adaptive optical test platform based on Hartmann wavefront sensor was built. The open-loop control experiment of the defocus wavefront using a ring actuator of the unimorph piezoelectric deformable mirror was carried out. The experiment results show that the voltage-deformation hysteresis of the unimorph piezoelectric deformable mirror is reduced from 9.3% to 1.2% after hysteresis elimination. The open-loop reconstruction accuracy of the defocus wavefront is improved by more than 70%, which proves that the proposed PI hysteresis model can be effectively applied in the open-loop control of the unimorph piezoelectric deformable mirror.

Keywords: unimorph piezoelectric deformable mirror; Prandtl-Ishlinskii (PI) hysteresis model; open-loop control; wavefront correction; defocus aberration

1 引 言

变形镜 (deformable mirror, DM) 是自适应光学系统 (adaptive optics, AO) 的核心部件, 可实时改变自身反射镜面的形貌, 校正光束中的畸变像差, 使系统达到或接近衍射极限, 在天文望远镜^[1]、激光束整形^[2-3]、视网膜成像^[4-5]等精密光学系统与仪器中具有重要的应用价值。其中基于压电材料驱动的变形镜因具有高驱动力、高频响、低功耗、高稳定性等优点^[6-7], 是目前应用较为广泛的变形镜。尽管压电变形镜具有种种优点, 但由于压电材料自身的非线性特性尤其是迟滞特性, 会导致压电变形镜开环控制精度和闭环控制带宽的下降^[8-9], 使其应用受到制约。例如, 在自适应光学视网膜成像仪器中, 受迟滞误差影响通常需要 10 ~ 20 次闭环迭代校正才能达到较好的结果^[4]。压电材料的迟滞非线性属于非局部储存型迟滞非线性, 即下一时刻的输出位移不仅取决于当前时刻的输入电压和输出位移, 还与之前输入的历史有关^[10-11]。为了克服迟滞影响, 研究人员采用迟滞模型描述压电变形镜的迟滞特性, Kibblewhite E. J. 等人^[12]采用四边形近似模型来对压电变形镜的迟滞进行消除, 但只能用来描述可预测的单周期信号; Yang Q 等人^[13]采用增强型 Coleman-Hodgdon 迟滞模型来消除双压电变形镜的迟滞影响, 使变形镜的闭环带宽提升 45%; Dubra A 等人^[14]则采用经典 Preisach 模型和广义非线性 Preisach 模型来减少双压电变形镜的位移迟滞, 在带波前传感器的自适应光学系统中进行开环控制实验, 使非线性误差从 20% 降至 3%。本文提出以 PI (Prandtl-Ishilinskii) 迟滞模型来建立和描述单压电变形镜的非线性模型, 相比于上述迟滞模型, PI 迟滞模型具有形式简单、参数少且逆模型易于求解等优点。首先建立单压电变形镜的 PI 迟滞模型并优化算子数目, 进而利用迟滞逆模型求出消除迟滞影响后的控制电压; 搭建了基于波前传感器的自适应光学测试系统; 最后根据迟滞补偿模型实现变形镜对离焦面形的高精度开环控制。

2 PI 迟滞模型介绍

2.1 PI 迟滞模型

PI 迟滞模型是一种基于纯现象的数学模型, 其建模参数和迟滞的物理实质之间没有任何的关系。Kuhnen K 等人^[15]对 PI 迟滞模型做了详细论述, 模型由多个 Backlash 迟滞算子的线性加权来描述压电陶瓷材料的迟滞特性, 而单个 Backlash 迟滞算子如图 1 所示。

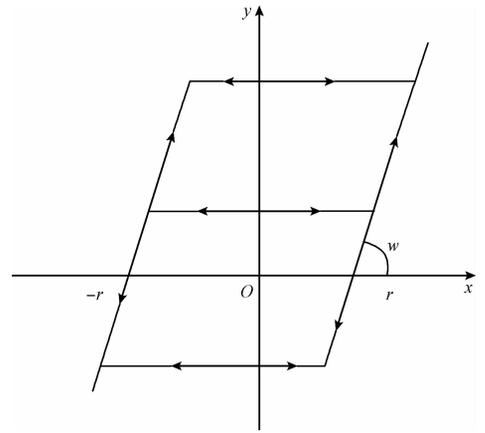


图 1 Backlash 算子

Fig. 1 Backlash operator

Backlash 迟滞算子的函数表达式为:

$$y = \begin{cases} w \cdot (x - r), & x - \frac{y}{w} = r \\ c, & -r < x - \frac{y}{w} < r \\ w \cdot (x + r), & x - \frac{y}{w} = -r \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 分别为 Backlash 迟滞算子的输入、输出, w 、 r 分别为 Backlash 迟滞算子的权重、阈值。为了运算方便, 上述 Backlash 算子函数常用数值迭代形式来描述:

$$y(t) = H[x(t), y_0] =$$

$$w \cdot \max\{x(t) - r, \min\{x(t) + r, y(t - T)\}\} \quad (2)$$

式中: H 为迟滞算子, T 为采样周期, y_0 为 Backlash 算子输出的初值。

尽管每个迟滞算子仅能表现出一个局部记忆滞回, 但叠加在一起就能表现为全局记忆性, 同时由于迟滞算子为斜坡函数, 所以可以更精确地拟合被描述对象的迟滞非线性特性。多个阈值不同、权重不同的 Backlash 迟滞算子叠加构成的 PI 迟滞模型可表示为:

$$y(t) = \sum_{i=0}^n w_i \cdot \max\{x(t) - r_i, \min\{x(t) + r_i,$$

$$y_i(t - T)\}\} = \mathbf{W}^T \mathbf{H}[\mathbf{x}, \mathbf{y}_0](t) \quad (3)$$

式中: \mathbf{x} 为模型输入的列向量, \mathbf{y}_0 是模型输出的初值列向量, $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_n]^T$ 是阈值向量, 且 $0 = r_0 < r_1 < \dots < r_n$, $\mathbf{W}^T = [w_0, w_1, \dots, w_n]$ 是权重向量。如果式(3)中的 r_i 、 w_i 确定后, 即可求得 PI 迟滞模型。 r_i 可采用等分阈值的方法来确定, 而 w_i 可根据实测迟滞曲线利用最小二乘法进行辨识。

2.2 PI 迟滞逆模型

PI 模型与经典的 Preisach 模型相比较其优点是 PI 模型存在解析逆, 并且它的逆模型 y 同样为 PI 模型, 但拥

有不同的阈值和权值,因此可以利用其逆模型来进行开环控制^[14]。由于二者的乘积为单位矩阵 E ,即 $yy' = E$,所以由式(3)可知,PI 模型的逆模型为:

$$y'(t) = (y(t))^{-1} = \sum_{i=0}^n (H[x(t), y_i(0)])^{-1} = \sum_{i=0}^n w'_i \cdot \max\{x(t) - r'_i, \min\{x(t) + r'_i, y'_i(t - T)\}\} \quad (4)$$

式中:

$$w'_0 = \frac{1}{w_0} \quad (5)$$

$$w'_i = \frac{-w_i}{(w_0 + \sum_{j=1}^i w_j)(w_0 + \sum_{j=1}^{i-1} w_j)} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$r'_i = \sum_{j=0}^i w_j \cdot (r_i - r_j) \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (7)$$

$$y'_i(0) = \sum_{j=0}^i w_j \cdot y_i(0) + \sum_{j=i+1}^n w_j \cdot y_j(0) \quad (8)$$

$i = 0, \dots, n$
逆模型中的阈值、权值、初始值与迟滞模型存在对应关系,将上一节辨识所得到的 PI 模型参数代入式(5)~(8),便可求得逆模型参数,然后将逆模型参数代入式(4),则可求得迟滞逆模型,进而得到控制电压,即可对压电变形镜进行开环控制。

3 压电变形镜及测试平台

实验采用项目组自行研制的单压电片变形镜进行迟滞研究^[16],如图2所示。变形镜由100 μm厚的压电陶瓷(piezoelectric ceramic transducer, PZT)层和200 μm厚的硅弹性层组成,其边界固支。变形镜中心10 mm区域为有效口径并用于波前校正。变形镜 Si 层和 PZT 层之间的金属层作为公共电极,PZT 背面的金属层图形化出20个电极(包括1个环形电极和19单元六边形方式排列的电极阵列)。当 PZT 上下电极施加电压时,压电陶瓷横向压电效应导致镜面弯曲变形,从而对波前像差进行校正。其中内部19单元致动器阵列可以用来校正波前像差,外部的环形致动器可以产生离焦变形。

为验证基于 PI 迟滞模型在压电变形镜开环控制中的有效性,搭建了基于哈特曼波前传感器的自适应光学测试实验系统,如图3所示。该系统采用4f光学系统设计,波前传感器的微透镜阵列与变形镜的反射面处于光学系统的共轭平面上。激光器采用 Thorlabs 的 HLS635 半导体激光器,通过光纤耦合输出,输出功率为1 mW,中心波长635 nm,功率稳定性≤1%。光纤输出的发散激光束经过120 mm 凸透镜准直,50%的光束透过消偏振片

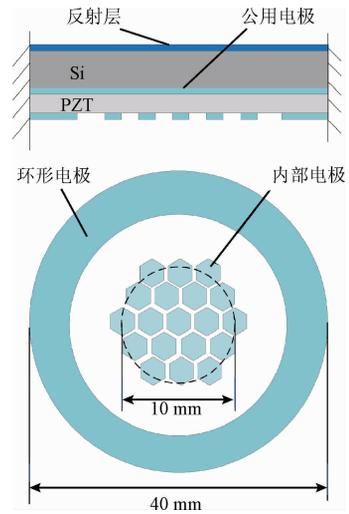


图2 单压电变形镜

Fig.2 Unimorph piezoelectric deformable mirror

光棱镜到达单压电变形镜的镜面,光束经镜面反射后再次经过分光棱镜,50%的光束90°方向反射到由两个凸透镜组成的缩束光路缩束(缩束比为4),最终光束的波前像差信息由哈特曼波前传感器(Thorlabs WFS150-7AR)接收。波前传感器的最大频率为15 Hz,实验中使用的微透镜阵列数为17×17,采用前65项 Zernike 多项式拟合波前。在测试过程中,由于波前传感器接收的光束经过入射、反射两个过程,实验测得的波前形貌为实际镜面变形的2倍。整个测试系统放置在光学隔振平台上并用有机玻璃罩(带遮光布)罩住,可有效减少外界机械振动及周围空气扰动对实验的干扰。开环控制实验时,计算机根据 PI 迟滞逆模型计算出控制电压,将控制指令发送给变形镜高压控制电源,之后通过波前传感器测量波前信息。

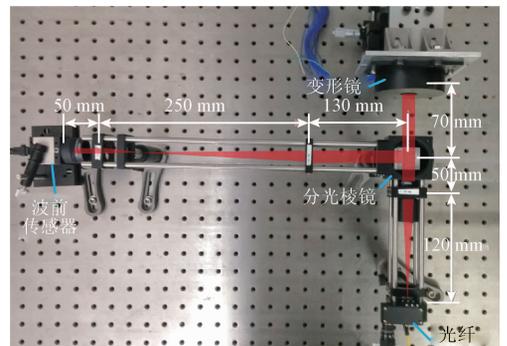


图3 AO 测试系统

Fig.3 AO experimental test system

图4所示为通过给变形镜环形致动器施加20 V电压来重构离焦,变形镜所产生的波前形貌及其去除倾斜项的前65项 Zernike 像差系数的展开图,均与理想离焦

波前像差相符。离焦面形的峰谷 (peak to valley, PV) 值为 $1.479\ \mu\text{m}$, 对应的均方根 (root mean square, RMS) 值为 $0.415\ \mu\text{m}$, 离焦项 Zernike 系数为 $0.415\ \mu\text{m}$, 远大于其他项系数。经计算去除离焦项后的波前残余误差 RMS 值仅为 $14\ \text{nm}$, 占重构面形的 3.4% , 表明环形致动器可以很好地重构离焦像差。离焦像差是光学系统中最为常见的像差之一, 离焦控制 (即焦距控制) 可应用于成像系统中的自动光学变焦^[17], 因此实验选取环形致动器进行迟滞消除研究。

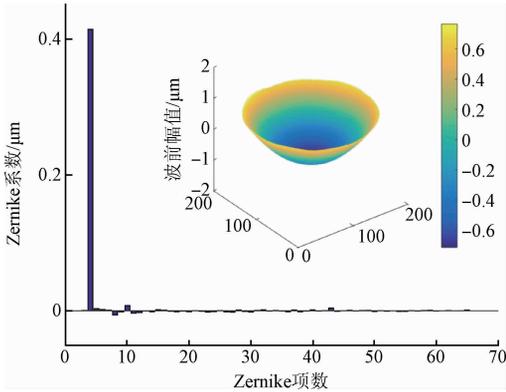


图 4 环形电极离焦面形重构的 Zernike 系数展开 (插图为重构面形的 3D 形貌)

Fig. 4 Zernike coefficient expansion of the reconstructed defocus wavefront for the ring actuator (the inset is the 3D profile of the reconstructed wavefront)

4 建模与控制实验

4.1 变形镜迟滞建模

要建立压电变形镜环形致动器的迟滞模型, 需要先获取压电变形镜环形致动器的电压-变形曲线, 用于 PI 迟滞模型参数辨识。针对实验中的单压电片变形镜, 采取对环形致动器施加 $0\sim 20\ \text{V}$ 三角波形式的激励电压, 使用波前传感器测量其面形。值得指出的是, 受波前传感器测量误差影响, 当采用面形 PV 值作为输出时, 跳动量为 $20\ \text{nm}$ 左右, 而采用面形 Zernike 离焦项系数表示时, 跳动量小于 $2\ \text{nm}$, 即采用重构面形的 Zernike 离焦项系数比 PV 值具有更高的数据稳定性, 因此用离焦项系数代表环形致动器重构的面形。实验测得的迟滞曲线如图 5 所示, 电压上升时镜面变形量线性度较好, 电压下降时压电变形镜表现出较大的非线性, 最大滞后量出现在 $11\ \text{V}$ 处, 约为 $37.5\ \text{nm}$, 占总变形量的 9.3% 。在实际变形镜控制中, 通常认为压电变形镜是一个线性系统, 即近似认为电压-变形为线性关系, 因此在无迟滞模型的开环控制中, 特别是在电压下降阶段, 近 10% 的迟滞使变形镜的面形控制精度降低。为弥补开环控制精度上的不

足, 闭环控制则需要多次迭代去校正近似线性所带来的控制误差, 实现高精度控制, 但多次迭代导致自适应光学系统工作带宽的下降, 制约了变形镜的应用。

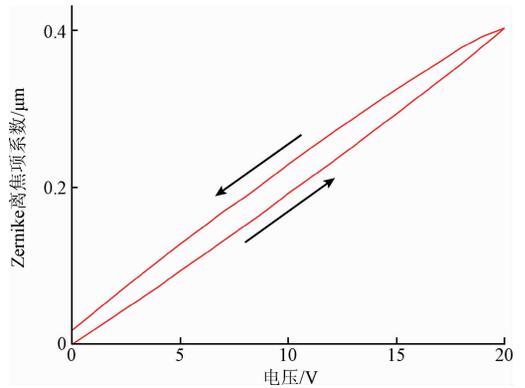
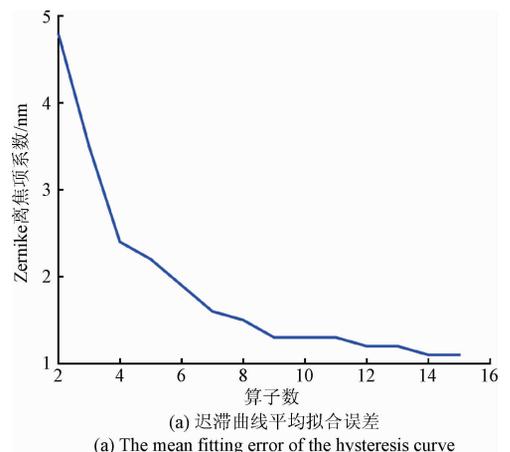


图 5 环形致动器的实测迟滞曲线

Fig. 5 The actually measured hysteresis curve of the ring actuator

根据式 (4) 可知, 利用 PI 迟滞逆模型求取电压时, 随着迟滞算子数目的增多, 运算量也随之增大。所以, 在保证逆模型精度的情况下, 为提高运算速度, 算子数越少越好。为了确定合理的算子数个数, 建模时将其分别取为 $2\sim 15$, 根据所测得的迟滞曲线, 通过最小二乘法便可辨识出相应的模型参数 w_i 。图 6 (a) 为不同算子数下的实测值与模型值之间的平均误差, 经比较, 当算子数超过 9 后, 模型误差的减小渐趋稳定, 已不明显, 故选择算子数为 9 进行辨识, 算子数为 9 时迟滞模型及其逆模型的阈值和权重如表 1 所示。图 6 (b) 为算子数为 9 时迟滞模型与实测迟滞曲线的拟合情况, 可知该模型能够很好地对迟滞曲线进行拟合, 拟合误差分布在 $-6.7\sim +3.4\ \text{nm}$, 平均误差为 $1.2\ \text{nm}$ 。由于 PI 迟滞算子是迟滞回线, 呈对称的平行四边形, 而测得的压电变形镜迟滞-面形曲线为不完全对称, 导致建模误差最大点出现在转角位置, 最大误差为 $6.7\ \text{nm}$ 。



(a) 迟滞曲线平均拟合误差

(a) The mean fitting error of the hysteresis curve

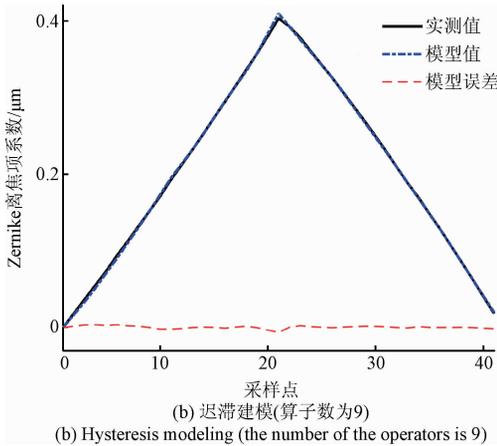


图6 迟滞建模与优化

Fig. 6 Hysteresis modeling and optimization

表1 PI模型及其逆模型的参数

Table 1 The parameters of the PI model and its inverse model

i	r_i	$w_i (1 \times 10^{-3})$	$r'_i (1 \times 10^{-3})$	w'_i
1	0	16.8	0	59.5
2	2.4	2.5	40.3	-7.6
3	4.8	0.7	86.6	-1.8
4	7.2	1.8	134.5	-4.1
5	9.6	-2.9	186.7	7.1
6	12.0	1.9	231.9	-4.8
7	14.4	0.2	281.6	-0.4
8	16.8	1.0	331.8	-2.2
9	19.2	10.1	384.3	-14.3

4.2 离焦变形开环控制

为验证基于PI迟滞模型的开环控制对压电变形镜控制精度提升的有效性,利用图4的AO测试平台进行开环测试。首先让环形致动器重构幅值为 $0.4 \mu\text{m}$ 的标准离焦面形,针对实际变形镜迟滞情况,计算机依据已经求取的PI迟滞逆模型(见式(4)),对所需重构的面形进行计算得到每个时刻需要输出的控制电压。消除迟滞前后的控制电压比较如图7(a)所示。在 $0 \sim 20 \text{ V}$ 的电压单调上升阶段,消除迟滞后的控制电压大于消除迟滞前电压,在 $20 \sim 0 \text{ V}$ 的单调下降阶段,迟滞消除后的控制电压明显低于迟滞未消除时的电压,这些电压差用于补偿压电变形镜的迟滞效应。计算得到的控制电压通过高压控制电源来驱动变形镜,最终波前信息由传感器采集得到,迟滞消除后所重构的离焦面形系数如图7(b)所示。从图7中可知,消除迟滞后的离焦面形变化曲线和目标

曲线(标准三角形)非常吻合,表明迟滞得到改善,经计算由9.3%降低到了1.2%。整个控制过程中的重构误差介于 $-6.9 \sim +6.2 \text{ nm}$,对应的RMS值为 3.9 nm ,相比于无迟滞模型的 18 nm 控制精度(由图5数据计算得到),重构精度提高了78%。

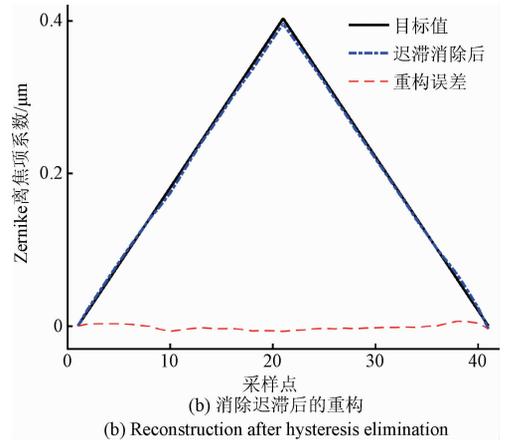
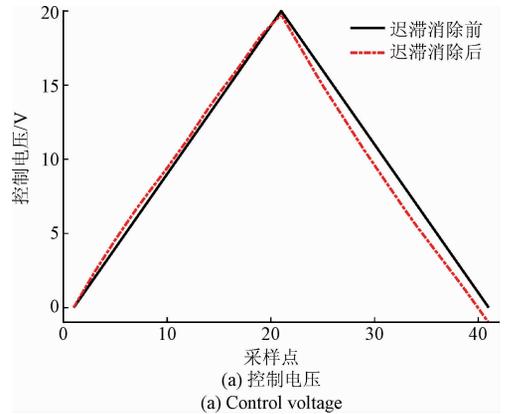


图7 幅值为标准三角波的离焦面形开环重构
Fig. 7 Defocus wavefront open-loop reconstruction when the amplitude is a standard triangular wave

进一步让环形致动器重构幅值为变幅值三角波(最大幅值为 $0.43 \mu\text{m}$)的离焦面形,对比迟滞消除前后压电变形镜的重构效果,其结果如图8所示。迟滞消除前,重构面形的离焦项系数在单调上升阶段线性较好,与目标值符合较好,但在下降阶段出现较大迟滞现象,这与迟滞曲线特性一致。整个过程中重构误差介于 $-27.2 \sim +10.8 \text{ nm}$,对应的RMS值为 14.6 nm 。迟滞消除后,重构面形的离焦项系数与目标曲线一致,上升和下降阶段都没有出现明显的迟滞现象,最大误差出现在转角处,这与建模误差具有一致性。整体重构误差介于 $-6.9 \sim +10.3 \text{ nm}$,对应的RMS为 4.0 nm ,相比较迟滞消除前重构精度提升了72.6%。

最后重构最大幅值为 $0.4 \mu\text{m}$ 的任意离焦面形,观察变形镜在迟滞消除前后对任意离焦面形的重构效果,结

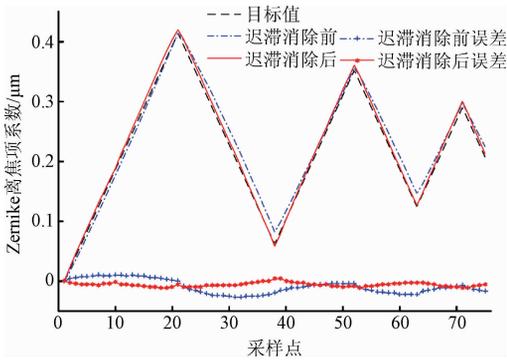


图8 幅值为变幅值三角波的离焦面形开环重构

Fig. 8 Defocus wavefront open-loop reconstruction when the amplitude is a triangular wave with variable amplitude

果如图9所示。迟滞消除前,重构值与目标值存在很大误差,不能很好地重构目标离焦面形,重构误差介于 $-26.5 \sim +7.9$ nm,对应的RMS为13.7 nm。迟滞消除后的重构面形得到明显改善,能够很好重构目标值,特别是在下降阶段,重构误差已经很小,整体重构误差介于 $-6.5 \sim +6.7$ nm,对应的RMS为3.5 nm,相比于迟滞消除前开环控制精度提高了74.5%,这进一步验证了迟滞消除的有效性。

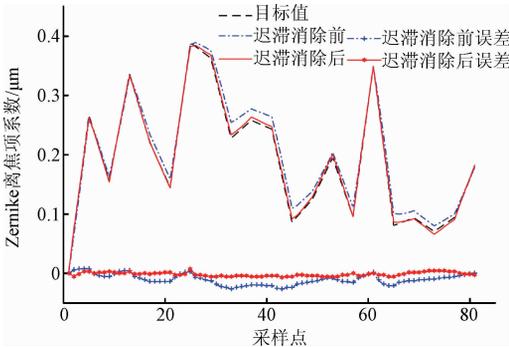


图9 随机幅值离焦面形开环重构

Fig. 9 Defocus wavefront open-loop reconstruction for random amplitude

4.3 应用分析

在自适应光学扫描激光视网膜成像系统中,变形镜不仅起到对人眼像差及系统像差的校正,使系统性能达到衍射极限,变形镜还在开环状态下产生一个离焦变形实现对扫描光点焦距的控制,使系统对不同层的视网膜细胞进行成像^[4]。本实验变形镜的中心电极阵列可用于波前像差校正,而环形电极可用来产生离焦变形。离焦 Z_4 项系数折算到屈光度的计算公式如下:

$$Diopter = \frac{16\sqrt{3} \times Z_4}{d^2} \quad (9)$$

式中: d 为人眼光瞳直径,取6 mm。则在100 V工作电压

下可产生约3.25屈光度,可调节眼球焦距约900 μm (眼轴长17 mm)。视网膜的厚度不到500 μm ,因此满足对视网膜不同层进行扫描的要求。本实验证明了PI迟滞模型可提高离焦面形的开环控制精度,可提高分层扫描的精度。

5 结论

提出了基于PI迟滞模型的单压电变形镜开环控制方法。利用PI迟滞模型建立单压电变形镜的迟滞模型,通过最小二乘法优化算子数,当算子数为9个时综合性能较好;搭建基于哈特曼波前传感器的自适应光学测试实验系统;最后利用PI逆模型计算开环控制电压,对离焦面形进行开环控制。实验结果表明:经过迟滞消除后变形镜的电压-变形迟滞由9.3%降低到1.2%。对于幅值为变幅值三角波(最大幅值为0.43 μm)的离焦面形,其控制误差的RMS值由迟滞消除前的14.6 nm下降为迟滞消除后的4.0 nm,重构精度提高72.6%。对于随机幅值的离焦面形重构,控制误差的RMS值从迟滞消除前的13.7 nm下降为迟滞消除后的3.5 nm,重构精度提高了74.5%。实验表明PI迟滞模型可对单压电变形镜进行有效的开环控制,进一步可以应用于单压电变形镜的闭环重构,在自适应光学应用中具有应用价值。

参考文献

- [1] ELLERBROEK B L. A status report on the thirty meter telescope adaptive optics program [J]. Journal of Astrophysics and Astronomy, 2013, 34(2): 121-139.
- [2] LEI X, WANG S, YAN H, et al. Double-deformable-mirror adaptive optics system for laser beam cleanup using blind optimization [J]. Optics express, 2012, 20(20): 22143-22157.
- [3] WLODARCZYK K L, BRYCE E, SCHWARTZ N, et al. Scalable stacked array piezoelectric deformable mirror for astronomy and laser processing applications [J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(2): 024502.
- [4] DAI Y, ZHAO L, XIAO F, et al. Adaptive optics vision simulation and perceptual learning system based on a 35-element bimorph deformable mirror [J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 979-985.
- [5] 肖飞, 戴云, 赵军磊, 等. 双变形镜人眼视网膜高分辨率显微成像系统 [J]. 光学学报, 2015(5): 29-36. XIAO F, DAI Y, ZHAO J L, et al. High-resolution retinal imaging system with dual deformable mirrors [J]. Acta Optica Sinica, 2015 (5): 29-36.
- [6] 王昱棠, 张宇鹏, 徐钰蕾. 压电陶瓷驱动快速反射镜双闭环控制 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(增刊1): 68-72.

- WANG Y T, ZHANG Y P, XU Y L. Dual-loop control strategy for fast-steering mirror driven by PZT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(Suppl. 1): 68-72.
- [7] 王学亮, 李佩玥, 郑楠, 等. 运放对压电陶瓷驱动电路系统精度影响的研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 33-36.
- WANG X L, LI P Y, ZHENG N, et al. Study on the impact of operational amplifier on system accuracy of the PZT driving circuit [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(10): 33-36.
- [8] LI H, LU J, SHI G, et al. Real-time blind deconvolution of retinal images in adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy [J]. Optics Communications, 2011, 284(13): 3258-3263.
- [9] 张春雷, 刘健, 王绍治, 等. 前馈控制算法校正相移微动台非线性运动[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 879-884.
- ZHANG CH L, LIU J, WANG SH ZH, et al. Feed forward control algorithm for nonlinear motion correction of phase shifting stage [J]. Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(8): 879-884.
- [10] 王栋, 于鹏, 周磊, 等. 基于梯形算子的 AFM 驱动器非对称迟滞性校正 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 32-39.
- WANG D, YU P, ZHOU L, et al. Asymmetric hysteresis calibration of AFM actuator based on keystone operator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 32-39.
- [11] 陈俊, 徐志伟, 陈杰. 压电驱动器驱动电源设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 48-53.
- CHEN J, XU ZH W, CHEN J. Design of the piezoelectric actuator driving power [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(4): 48-53.
- [12] KIBBLEWHITE E J, SMUTKO M F, SHI F. Effect of hysteresis on the performance of deformable mirrors and methods of its compensation [C]. Symposium on Astronomical Telescopes & Instrumentation for the 21st Century, 1994: 754-761.
- [13] YANG Q, FTACLAS C, CHUN M, et al. Hysteresis correction in the curvature adaptive optics system [J]. Journal of the Optical Society of American A Optics Image Science & Vision, 2005, 22(1): 142-147.
- [14] DUBRA A, MASSA J, PATERSON C. Preisach classical

and nonlinear modeling of hysteresis in piezoceramic deformable mirrors[J]. Optics Express, 2005, 13(22): 9062-9070.

- [15] KUHNEN K. Modeling, identification and compensation of complex hysteretic nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii approach [J]. European Journal of Control, 2003, 9(4): 407-418.
- [16] MA J, LIU Y, HE T, et al. Double drive modes unimorph deformable mirror for low-cost adaptive optics[J]. Applied Optics, 2011, 50(29): 5647-5654.
- [17] WEI H C, CHIEN Y H, HSU W Y, et al. Controlling a MEMS deformable mirror in a miniature auto-focusing imaging system [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(6): 1592-1596.

作者简介



田雷, 2014 年于武汉理工大学华夏学院获得学士学位, 现为宁波大学在读硕士研究生, 主要研究方向为压电器件设计及变形镜控制理论。

E-mail: 494462545@qq.com

Tian Lei received his B. Sc. degree in 2014 from Huaxia College, Wuhan University of Technology. Now, he is a master student in Ningbo University. His main research interest includes piezoelectric device design and deformable mirror control theory.



陈俊杰, 2012 年于中国科学技术大学获得学士学位, 现为中国科学技术大学在读博士, 主要研究方向为微机电系统。

E-mail: chjj1219@mail.ustc.edu.cn

Chen Junjie received his bachelor degree in 2012 from University of Science and Technology of China (USTC). He is now a Ph. D. candidate at USTC. His main research interest include micro-electromechanical systems (MEMS).



马剑强 (通讯作者), 2012 年于中国科学技术大学获得博士学位, 现为宁波大学副教授, 主要研究方向包括压电器件、变形镜和自适应光学技术。

E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn

Ma Jianqiang (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2012 from University of Science and Technology of China (USTC). Now he is an associate professor at Ningbo University. His main research interest includes piezoelectric device, deformable mirror and adaptive optics.