

基于泽尼克多项式的单压电变形镜 PID 控制

章家连, 李 艳, 彭泰然, 李文来, 马剑强*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了提高变形镜的控制精度及简化控制, 提出采用基于泽尼克(Zernike)多项式的 PID 控制算法, 实现对单压电变形镜的闭环反馈控制. 首先, 建立基于 Zernike 多项式的 PID 闭环控制模型. 其次, 搭建基于哈特曼波前传感器的自适应光学测试平台, 使用 62 单元单压电变形镜进行闭环控制实验. 最后, 通过相位片模拟扰动像差, 并对扰动像差进行实时 PID 闭环校正. 实验结果表明: 在相位片旋转速度和外界扰动像差相同的条件下, 采用基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法对波前像差进行校正, 比采用直接反馈方法校正精度提高了 50%左右. 证明采用基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法能提高单压电变形镜动态像差的校正精度以及简化控制系统.

关键词: 自适应光学; 单压电变形镜; PID 控制; Zernike 多项式; 波前校正

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 06-0055-05

自适应光学系统是一种实时闭环反馈控制系统, 通过实时测量并校正光学波前畸变, 能够补偿由于大气湍流造成的传输光束动态波前畸变, 使得系统具有适应外界环境变化的能力^[1-4]. 变形镜是自适应光学系统中的重要部件, 通过实时改变自身形状达到校正波前畸变的目的^[5]. 由于在整个校正过程中, 波前像差是实时变化的, 因此必须提高变形镜的控制精度^[3,6-7]. 田雷等^[8]采用单压电变形镜的环形致动器对离焦面形进行开环控制, 但相比于闭环控制, 其精度较低. 郑兆英等^[9]采用 PID 控制算法对倾斜项像差进行校正, 得到了较好的校正效果, 后期可以应用于更高阶像差的校正. Wu 等^[10]将多变量 PID 闭环控制算法应用于磁流体变形镜的驱动电压控制, 并对静态和动态波前像差进行了重构.

PID 控制通常以各个致动器的驱动电压为控制对象, 致动器数目越多, 控制系统越复杂, 当致动器数目超过 100 个时, 控制运算比较繁琐. 本研究以波前像差的泽尼克(Zernike)多项式系数为变量进行 PID 控制, 相比于上述基于致动器驱动电压

的 PID 控制, 该控制算法直接对 Zernike 多项式系数进行运算, 能够有效减少运算量, 简化控制系统. 首先, 建立基于 Zernike 多项式的 PID 闭环控制模型. 其次, 搭建自适应光学测试平台. 最后, 通过相位片模拟外界动态扰动像差, 并对扰动像差进行实时 PID 闭环校正. 实验结果表明, 采用基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法并整定 PID 控制器参数, 能够提高单压电变形镜的校正精度, 简化控制系统.

1 基于 Zernike 多项式的 PID 闭环控制模型

图 1 所示为基于 Zernike 多项式的 PID 闭环控制模型, 主要由哈特曼波前传感器、波前校正器(单压电变形镜)、PID 控制器、波前重构环节组成. 哈特曼波前传感器实时测量波前像差, 波前重构环节根据 PID 控制器运算得到的输出值计算变形镜控制电压, 然后将控制电压施加到变形镜上, 实现波前像差的闭环反馈校正^[11-12]. 图 1 中 a_r 为外界扰动像差; a_n 为哈特曼波前传感器实测波前像差; a_f 为实时反馈补偿像差; a_0 为设定的理想波前形状;

收稿日期: 2017-12-06.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省公益技术研究 (LGF18E050001); 宁波市自然科学基金 (2017A610078).

第一作者: 章家连 (1992-), 男, 浙江平湖, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 压电变形镜控制. E-mail: 18018039192@163.com

*通信作者: 马剑强 (1983-), 男, 浙江台州, 副教授, 主要研究方向: 压电变形镜和自适应光学技术. E-mail: majianqiang@nbu.edu.cn

a_e 为波前残余误差; Δa_v 为 PID 控制器输出量; a_v 为实时需要校正的像差; V 为波前重构环节计算得到的变形镜控制电压。

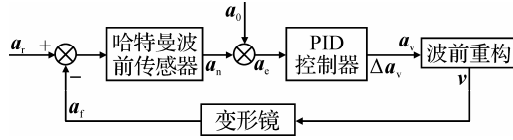


图1 自适应光学系统PID闭环控制模型

通常波前相位 $\varphi(x, y)$ 采用 Zernike 多项式表示:

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^n a_k Z_k(x, y), \quad (1)$$

式中: a_k 为第 k 项 Zernike 多项式系数; Z_k 为第 k 项 Zernike 多项式; n 为采用的 Zernike 多项式项数. Zernike 多项式的系数矢量 $\mathbf{a}=[a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ 可表示波前信息, T 表示向量的转置。

变形镜驱动器的控制电压与形变的关系用影响函数描述, 将各个驱动器影响函数的 Zernike 系数保存到影响函数矩阵 $\mathbf{B}$ 中, 则得到镜面形变 $\mathbf{a}_f$ 与驱动器电压 $\mathbf{V}$ 之间的关系:

$$\mathbf{a}_f = \mathbf{B} \cdot \mathbf{V}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} a_{f1} \\ a_{f2} \\ \dots \\ a_{fm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m,1} & b_{m,2} & \dots & b_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix},$$

式中: n 为变形镜驱动器数目; $\mathbf{B}$ 为变形镜的影响函数矩阵, 代表了变形镜的空间信息, 可以通过实验测得. 要对波前像差 $\mathbf{a}_v$ 进行校正, 即令 $\mathbf{a}_f + \mathbf{a}_v = 0$, 可得

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{V} + \mathbf{a}_v = 0. \quad (3)$$

采用 SVD(奇异值分解)算法对影响函数矩阵 $\mathbf{B}$ 进行分解, 可得变形镜控制电压:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{B}^+ \cdot \mathbf{a}_v, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{a}_v$ 作为波前重构环节的输入值, 通过 PID 控制器输出值得到。

PID 控制器输入值为波前残余误差矢量 $\mathbf{a}_e = [a_{e1}, a_{e2}, \dots, a_{en}]^T$, 表达式为

$$\mathbf{a}_e = \mathbf{a}_0 - \mathbf{a}_f + \mathbf{a}_v. \quad (5)$$

本研究采用增量式 PID 控制算法^[13-14], 确定了参数 K_p , K_i 和 K_d , 只需使用前后 3 次计算得到的残余误差值 $\mathbf{a}_e(k)$, $\mathbf{a}_e(k-1)$ 和 $\mathbf{a}_e(k-2)$, 即可得到第 k 次循环的 PID 控制器输出量 $\Delta \mathbf{a}_v(k)$,

$$\Delta \mathbf{a}_v(k) = K_p(\mathbf{a}_e(k) - \mathbf{a}_e(k-1)) + K_i \mathbf{a}_e(k) + K_d(\mathbf{a}_e(k) - 2\mathbf{a}_e(k-1) + \mathbf{a}_e(k-2)). \quad (6)$$

每一项 Zernike 多项式系数对应一个 PID 控制器, 因此比例系数矢量 $\mathbf{K}_p = [K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pn}]^T$; 积分系数矢量 $\mathbf{K}_i = [K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{in}]^T$; 微分系数矢量 $\mathbf{K}_d = [K_{d1}, K_{d2}, \dots, K_{dn}]^T$. 对每一项 Zernike 多项式的 PID 控制器参数取值时, 采用相同的参数即 K_p , K_i 和 K_d 就能获得良好的校正效果. 输出量 $\Delta \mathbf{a}_v(k)$ 对应第 k 次循环像差的增量, 由此可得变形镜需要校正的像差 $\mathbf{a}_v$ 为

$$\mathbf{a}_v(k) = \mathbf{a}_v(k-1) + \Delta \mathbf{a}_v(k). \quad (7)$$

在波前重构环节根据需要校正的像差 $\mathbf{a}_v(k)$ 计算变形镜控制电压, 将控制电压 $\mathbf{V}$ 施加到各个致动器单元, 变形镜产生与波前像差相共轭的面形。

2 自适应光学系统描述

为了验证基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法能否有效改善单压电变形镜的控制精度及简化控制, 在实验室搭建了基于波前直接测量的自适应光学测试平台^[8,15], 如图 2 所示。

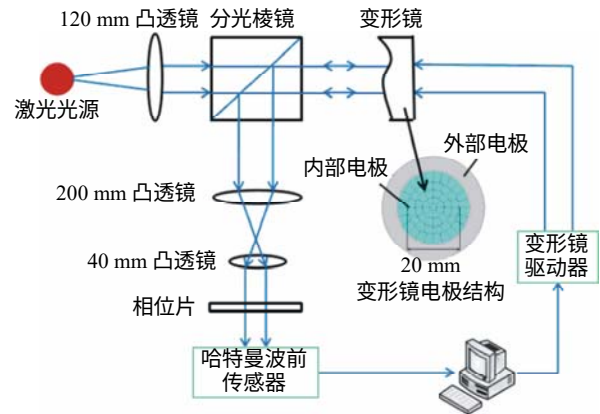


图2 自适应光学系统测试平台框图

测试平台采用 Thorlabs 公司的哈特曼波前传感器(WFS150-7AR)和自制的 62 单元双驱动模式单压电片变形镜为主要器件. 光源采用 Thorlabs 公司的 HLS635 半导体激光器, 输出功率为 1 mW, 中心波长为 635 nm. 光纤输出的激光束经过 120 mm 凸透镜扩束并准直, 50% 的光束透过非偏振分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分光, 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 5), 然后通过旋转的相位片(模拟外界扰动像差), 最终光束

的波前信息由哈特曼波前传感器接收, 波前传感器的最大帧率为 15 Hz. 由 PC 机接收波前传感器测得的波前信息, 然后在控制系统上经过分析、处理和运算获得相应的控制电压, 通过驱动系统加载到变形镜上, 控制变形镜产生所需的面形, 实现波前像差的闭环反馈校正. 驱动控制系统的工作带宽为 5~6 Hz.

62 单元单压电变形镜的硅片表面反射层用于像差校正, PZT 背面金属层图形化出 62 个电极, 包括 1 个环形电极和 61 单元的环形电极阵列, 变形镜电极结构如图 2 所示. 变形镜用于校正的有效口径为 20 mm, 重构能力较好, 能有效校正低阶像差, 镜面校平后平面度 RMS 值小于 $0.025\ \mu\text{m}$.

3 控制实验与结果分析

为验证基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法能否有效消除外界扰动像差, 利用图 2 所示的自适应光学测试平台对外界扰动像差 a_r 进行实时校正. 在实时校正过程中, 首先用哈特曼波前传感器测量由相位片旋转产生的扰动像差, 取迭代次数 100 次, 如图 3 所示.

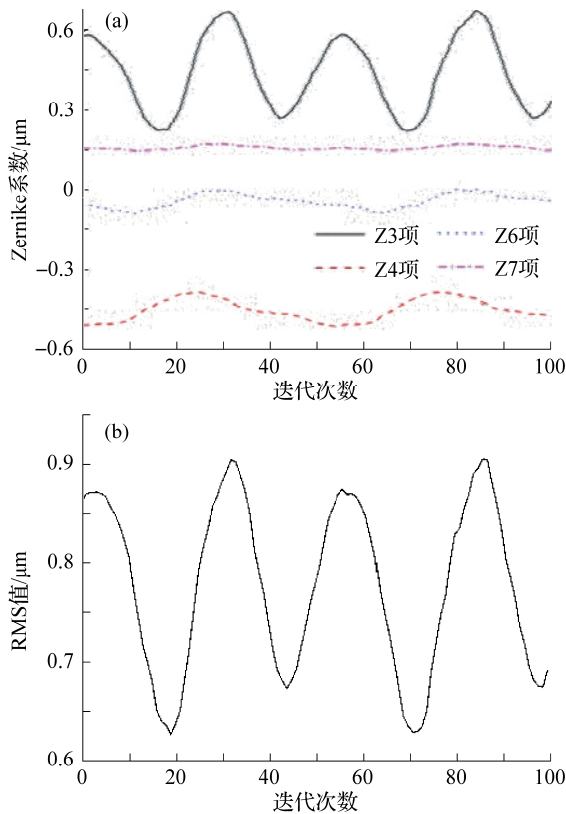


图3 校正前动态扰动波前像差

扰动像差主要由低阶 Zernike 像差组成, 其中图 3(a)为扰动像差中的像散 Z3、离焦 Z4、三叶草像差 Z6 和彗差 Z7 项系数变化图, 随着相位片旋转而变化, Z3 项幅值在 $0.2\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 之间波动, Z4 项幅值在 $-0.6\sim -0.3\ \mu\text{m}$ 之间波动, Z6 项幅值在 $-0.2\sim 0\ \mu\text{m}$ 之间波动, Z7 项幅值在 $-0.6\sim -0.3\ \mu\text{m}$ 之间波动. 图 3(b)为扰动像差 RMS 值变化图, 其幅值在 $0.6\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 之间波动, 平均 RMS 值为 $0.694\ \mu\text{m}$. 由相位片模拟产生的扰动像差皆为低阶像差且在变形镜校正范围内.

图 4 为校正后实时测得的波前残余误差 a_e 变化.

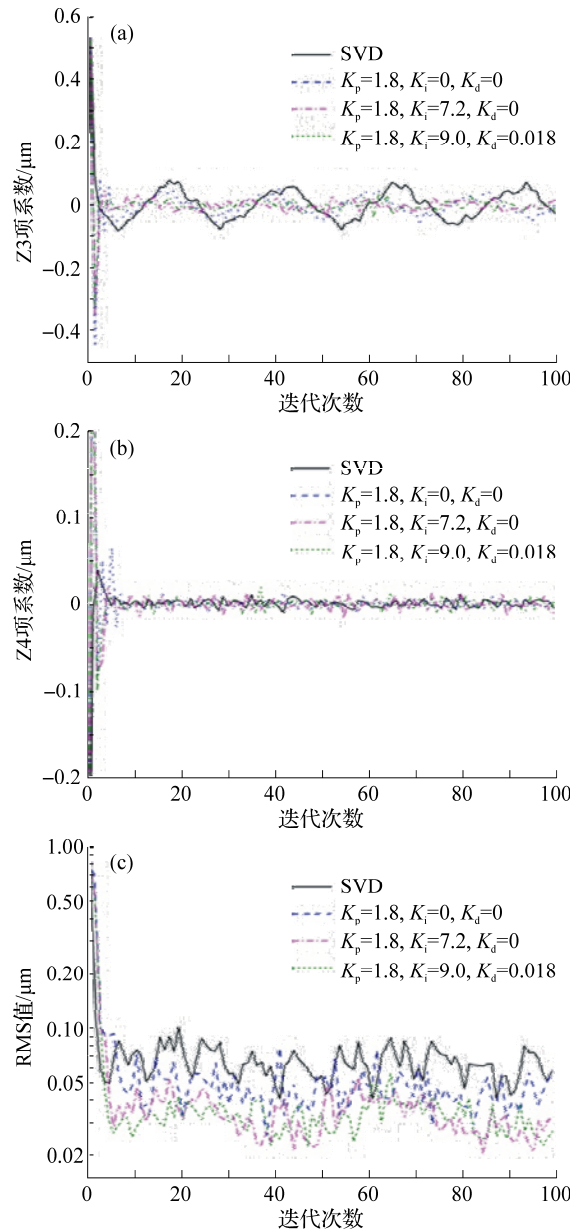


图4 动态扰动波前像差校正后 Z3、Z4 项系数与 RMS 值

然后将波前残余误差 a_e 输入到 PID 控制器, PID 控制器输出值经过计算得到 a_v , 由公式(4)计算变形镜控制电压并施加到变形镜上, 使变形镜产生与波前像差相共轭的面形, 最后残余误差由哈特曼波前传感器接收并反馈到控制系统中, 实现像差的实时闭环反馈校正。图 4(a)和(b)所示分别为残余误差中 Z3 和 Z4 项系数变化, 图 4(c)为波前残余误差 RMS 值变化图。采用 SVD 算法对像差进行校正, 校正后残余误差平均 RMS 值为 $0.065 \mu\text{m}$ 。PID 控制时, 通过调节 K_p 值能有效减小残余误差, 但系统的振荡增强, 稳定性下降, 得到校正后残余误差平均 RMS 值为 $0.046 \mu\text{m}$ 。通过调节 K_i 值能有效减小振荡, 提高系统的稳定性, 得到残余误差平均 RMS 值为 $0.033 \mu\text{m}$ 。通过调节 K_d 值能减弱振荡, 增强稳定性, 但调节 K_d 值对减小系统残余误差基本没有作用, 得到平均残余误差 RMS 值为 $0.032 \mu\text{m}$ 。通过整定 PID 控制器参数, 能有效减小残余误差, 当 PID 参数 $K_p=1.8$, $K_i=9$, $K_d=0.018$ 时校正效果最好, 其平均残余误差 RMS 值为 $0.032 \mu\text{m}$, 比采用 SVD 算法校正精度提升了 50.8%。

图 5 对比了校正前与校正后(第 44 次迭代)的三维形貌。校正前外界扰动像差主要为低阶像差, 像差 RMS 值为 $0.671 \mu\text{m}$, 其中 Z3 和 Z4 项系数分别为 $0.280 \mu\text{m}$ 和 $-0.470 \mu\text{m}$ 。校正后像差的三维形貌有所改善, 但由于外界扰动像差是实时产生的, 因此存在残余误差, 通过整定 PID 控制器参数, 残余误差不断被校正, 三维形貌趋于平整, 最终残余误差 RMS 值为 $0.021 \mu\text{m}$ 。

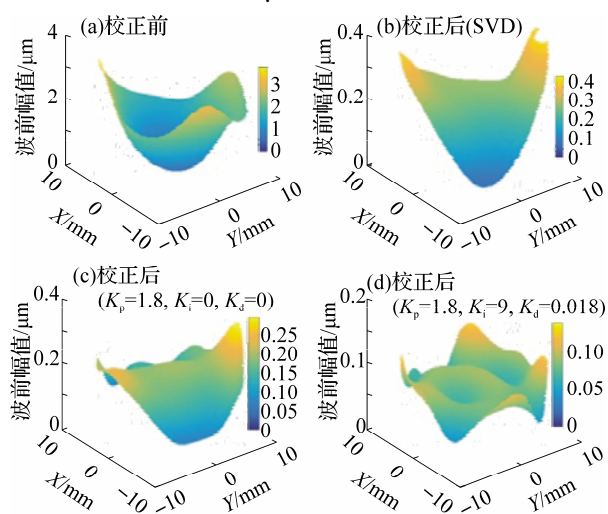


图 5 三维形貌图

为检验基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法对不同外界扰动像差的校正效果, 使用不同像差和不同旋转速度的相位片模拟扰动像差。从表 1 可知当模拟扰动像差的相位片旋转速度不断增大时, 像差校正效果变差。当模拟的扰动像差增大时, 相应的校正效果也变差(受限于控制系统的工作带宽与变形镜的校正能力)。目前的光学系统在相位片旋转速度较慢与外界扰动像差较小的条件下校正效果较好。从表 1 可知在相位片旋转速度和扰动像差相同的条件下, 采用基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法, 比采用 SVD 方法校正精度整体提高了 50%左右。

表 1 不同条件下闭环校正比较

相位片转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	校正前 RMS 值/ μm	SVD 校正/ μm	PID 校正/ μm	提升率/ %
6	0.694	0.065	0.032	50.8
12	0.667	0.112	0.061	45.5
18	0.642	0.212	0.155	26.9
6	0.951	0.174	0.065	62.6

4 结论

提出了基于 Zernike 多项式的单压电变形镜 PID 闭环控制方法, 对外界扰动像差进行实时校正。实验结果表明: 在相位片旋转速度为 $6 \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和外界扰动像差 RMS 值为 $0.694 \mu\text{m}$ 时, 采用基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法, 比采用 SVD 算法校正精度整体提高了 50.8%。表明采用基于 Zernike 多项式的 PID 控制算法能提高单压电变形镜的校正精度以及简化控制。但是模拟扰动像差的相位片旋转速度和曲率变大时, 采用 PID 控制算法的校正效果不太理想, 后续可以在 PID 控制算法的基础上加入其他智能算法(比如神经网络算法、遗传算法等), 进一步提高变形镜的校正精度。

参考文献:

- [1] Love G D, Tyson R K. Principles of adaptive optics[J]. Optics & Lasers in Engineering, 1998, 50(2):104.
- [2] 姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, 28(1):7-13.
- [3] 颜召军, 李新阳, 饶长辉. 自适应光学闭环系统实时多路自适应控制算法[EB/OL]. [2016-12-15]. <http://www.opticsjournal.net/Articles/abstract?aid=OJ1301160001666B9EaH>.

- [4] Sivo G, Kulcsár C, Conan J M, et al. First on-sky SCAO validation of full LQG control with vibration mitigation on the CANARY pathfinder[J]. Optics Express, 2014, 22(19):23565-23591.
- [5] Devaney N, Dalimier E, Farrell T, et al. Correction of ocular and atmospheric wavefronts: A comparison of the performance of various deformable mirrors[J]. Applied Optics, 2008, 47(35):50-65.
- [6] 李新阳, 姜文汉, 王春红, 等. 自适应光学系统中的自适应控制算法研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3):283-291.
- [7] Boyer C, Gilles L, Ellerbrock B, et al. Update on the TMT adaptive optics real time controller[EB/OL]. [2016-09-05]. https://www.researchgate.net/publication/228657121_Update_on_the_TMT_Adaptive_Optics_Real_Time_Controller.
- [8] 田雷, 陈俊杰, 崔玉国, 等. 基于 PI 迟滞模型的单压电变形镜开环控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1):136-142.
- [9] Zheng Z, Li C, Li B, et al. Analysis and demonstration of PID algorithm based on arranging the transient process for adaptive optics[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(11):1-4.
- [10] Wu Z, Iqbal A, Ben Amara F. LMI-based multivariable PID controller design and its application to the control of the surface shape of magnetic fluid deformable mirrors[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(4):717-729.
- [11] 颜召军, 李新阳, 饶长辉. 一种自适应光学闭环系统预测控制算法的仿真研究[EB/OL]. [2016-10-21]. <http://www.opticsjournal.net/Articles/abstract?aid=OJ10122400038bleKhN>.
- [12] 刘章文, 周志强, 李正东. 基于模糊控制的波前校正技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017(3):62-69.
- [13] Feng G S, Wu J Z. Arbitrary frequency stabilization of a diode laser based on visual Labview PID VI and sound card output[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(10):248-251.
- [14] Iqbal A, Wu Z, Ben Amara F. A decentralized robust PID controller design for the shape control of a magnetic fluid deformable mirror[J]. International Journal of Optomechatronics, 2010, 4(3):246-268.
- [15] Escárate P, Agüero J C, Zúñiga S, et al. Linear quadratic regulator for laser beam shaping[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2017, 94:90-96.

PID control based on Zernike polynomials for unimorph deformable mirror

ZHANG Jia-lian, LI Yan, PENG Tai-ran, LI Wen-lai, MA Jian-qiang*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy of deformable mirror and simplify the control, a PID control algorithm based on Zernike polynomials is presented and then the closed-loop feedback control of unimorph deformable mirror is realized. Firstly, a PID closed-loop control model based on Zernike polynomials was established. Secondly, an adaptive optical test platform based on Hartmann wavefront sensor was built. Closed-loop control experiment was performed using 62 elements unimorph deformable mirror. Finally, the disturbance of aberrations was simulated by the rotated phase plate. The disturbance of aberrations was corrected in real-time by the deformable mirror with PID closed-loop algorithm. The experimental results show that the correction accuracy of PID control algorithm based on Zernike polynomials is improved by about 50% compared with the direct feedback control method, under the conditions of the same phase plate rotating speed and the same external aberrations. It is proved that PID control algorithm based on Zernike polynomials can improve the correction accuracy of dynamic aberrations for unimorph deformable mirror and simplify the control system.

Key words: adaptive optics; unimorph deformable mirror; PID control; Zernike polynomials; wavefront correction

(责任编辑 韩 超)