

基于模糊控制的波前校正技术

刘章文, 周志强, 李正东

中国工程物理研究院应用电子学研究所高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 模糊控制由于不依赖变形镜的响应模型,用于波前校正时具有实用性,其可行性已被证实。对自适应光学系统中模糊比例积分微分(PID)控制的波前校正效果进行了评估,包括对模糊校正带宽的测试、对模糊输入和输出论域的选取以及对模糊规则库以及波面加权模板的优化。实验结果表明,论域的选取合理,采用 3×3 的波前加权模板效果更好。当PID控制器3个参数矢量 K_P 、 K_I 和 K_D 的初始值都为 $\mathbf{0}$ 时,模糊输出论域采用隶属度正分布的规则库实用性更强。当哈特曼-夏克传感器刷新频率为120 Hz时,系统校正带宽为5~6 Hz,与常规PID一致。

关键词 自适应光学; 模糊控制; 波前校正; 变形镜

中图分类号 TP273+.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.030101

Wavefront Correction Technology Based on Fuzzy Control

Liu Zhangwen, Zhou Zhiqiang, Li Zhengdong

Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract Fuzzy control is used in wavefront correction and its feasibility has been confirmed because it does not depend on the response model of deformable mirror. The wavefront correction effect of fuzzy proportion integration differentiation (PID) control in adaptive optical system is assessed, including testing fuzzy correction bandwidth, selecting fuzzy input and output domains, and optimizing fuzzy rule base and wavefront weighted template. Experimental results show that the selection of fuzzy domain is reasonable, and the better results are obtained with a 3×3 wavefront weighted template. When the initial values of K_P , K_I and K_D of PID controller are $\mathbf{0}$, the rule base with membership degree positive distribution is more suitable for the fuzzy output domain. When the refresh rate of the Hartmann-Shack sensor is 120 Hz, the system correction bandwidth is 5-6 Hz, which is consistent with the conventional PID.

Key words adaptive optics; fuzzy control; wavefront correction; deformable mirror

OCIS codes 010.1080; 140.3300

1 引言

基于哈特曼-夏克(H-S)传感器的波前校正系统是自适应光学系统中高速实时校正技术中使用最普遍的方法^[1-6]。直接使用比例积分微分(PID)控制加相应算法获得较好的实用效果^[1-2],例如利用开环波前预测大气湍流^[3],利用两个波前传感器加倾斜镜来校正频率带宽为50 Hz的波前残差^[4],以及采用修正算法修正有效带宽^[5],均广泛采用了PID控制器。传统PID控制严格依赖变形镜的响应模型,为了摆脱对变形镜模型的依赖并提高系统的稳定性,Liu等^[6]提出了一种将模糊控制与PID相结合的模糊校正方法,并通过实验确证了其可行性^[6-8]。该方法不依赖变形镜的响应模型,无需对响应矩阵进行标定^[9],但需要利用快速波面重构算法^[10]。由于对变形镜模型的标定限制了其在光路上的装配位置,因此加入模糊控制后可增加系统校正的适应能力,降低系统光路安装调试的难度,提高校正效率。

针对文献^[7]提出的模糊PID校正方法,对模糊输入和输出论域的选取、模糊规则库以及波面加权模板进行了

收稿日期: 2016-10-14; 收到修改稿日期: 2016-10-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA8022006)

作者简介: 刘章文(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事主动自适应光学等方面的研究。E-mail: 625692083@qq.com

优化选择实验,并对常规的PID校正方法进行了对比。结果表明,模糊PID在不需变形镜标定矩阵的条件下,关键指标与常规PID校正效果一致且稳定性指标略好,从而证明了模糊控制不依赖于变形镜的响应模型。

2 模糊控制模型及校正原理

模糊PID控制模型如图1所示。H-S传感器探测质心斜率 S_0 的过程中会加入各种扰动,参数 G_r 为大气湍流扰动, G_n 为探测噪声, S_n 为输出波前斜率, $\Delta\Phi$ 为实时重构出的波前, V_n 为经过模糊PID运算后的变形镜控制电压矢量, Z_A^{-1} 和 Z_B^{-1} 分别为H-S探测器延时和控制计算延时(系统总延迟为2个采样周期)^[2]。如图1所示,SWC为波面重构环节;SWE为波面评价环节,该环节主要是在波前 $\Delta\Phi$ 中提取波面评价指标矢量 $\mathbf{J}=[j^{(0)}, j^{(1)}, \dots]$ (上标括号中的数字为通道编号,下同),元素 $j^{(n)}$ 对应 n 号驱动器的评价指标,反映该驱动器相对于理想波面的深度信息。给定理想0平面的评价指标矢量 \mathbf{J}_0 ,评价指标 \mathbf{J} 与 \mathbf{J}_0 之差为矢量 \mathbf{E} ,将 \mathbf{E} 作为PID控制器的输入,并对 \mathbf{E} 作差分处理以获得误差差分矢量 \mathbf{EC} ,将 \mathbf{E} 和 \mathbf{EC} 作为模糊控制器的决策输入,模糊控制器的输出为PID的3个参数矢量 \mathbf{K}_P 、 \mathbf{K}_I 和 \mathbf{K}_D 。每一个驱动器对应一个模糊PID控制器,因此所有驱动器形成的参数矢量为误差 $\mathbf{E}=[e^{(0)}, e^{(1)}, \dots]$,误差差分矢量 $\mathbf{EC}=[e_c^{(0)}, e_c^{(1)}, \dots]$,比例参数矢量 $\mathbf{K}_P=[k_p^{(0)}, k_p^{(1)}, \dots]$,积分参数矢量 $\mathbf{K}_I=[k_i^{(0)}, k_i^{(1)}, \dots]$,微分参数矢量 $\mathbf{K}_D=[k_d^{(0)}, k_d^{(1)}, \dots]$ 。 \mathbf{E} 和 \mathbf{EC} 的取值范围即构成模糊控制器的输入论域 $\{\mathbf{E}\}$ 和 $\{\mathbf{EC}\}$, \mathbf{K}_P 、 \mathbf{K}_I 和 \mathbf{K}_D 的范围构成模糊控制器的输出论域 $\{\mathbf{K}_P\}$ 、 $\{\mathbf{K}_I\}$ 和 $\{\mathbf{K}_D\}$,符号 $\{\cdot\}$ 表示集合。

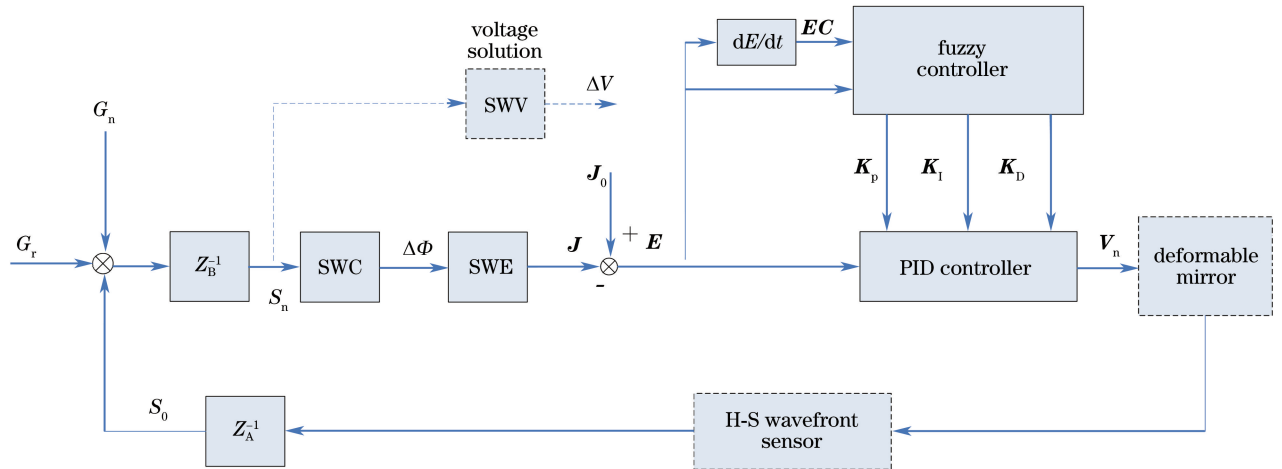


图1 自适应光学系统模糊PID控制数学模型

Fig. 1 Mathematical model of fuzzy PID control in adaptive optical system

图1中虚线框SWV为常规PID控制时的电压解算环节,电压残差 ΔV 可表示为

$$\Delta V = \Delta\Phi\mathbf{B} = S_n\mathbf{BA} = S_n\mathbf{C}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{B} 为变形镜的响应矩阵, \mathbf{A} 为波前重构矩阵, $\mathbf{C}=\mathbf{AB}$ 。常规PID控制没有波面评价环节SWE,而是直接由 S_n 通过电压解算环节SWV解出电压残差 ΔV 并将其输入到PID控制器,如图1所示的虚线框。波面评价函数确定后,第 n 次、第 m 通道的输出电压为^[6]

$$v^{(m)}(n) = v_0 + \Delta v^{(m)}(n), \quad (2)$$

式中 v_0 为初始电压, $\Delta v^{(m)}(n)$ 为PID模糊自整定后的输出电压,即

$$\Delta v^{(m)}(n) = r \cdot k_p^{(m)} \cdot e^{(m)}(n) + r \cdot k_i^{(m)} \cdot \sum_{k=1}^n e^{(m)}(k) + r \cdot k_d^{(m)} \cdot [e^{(m)}(n) - e^{(m)}(n-1)], \quad (3)$$

式中 r 为固定比例系数, $e^{(m)}(n)$ 为第 n 次、第 m 通道的评价指标的残差,即

$$e^{(m)}(n) = j^{(m)}(n) - j_0 = j^{(m)}(n). \quad (4)$$

若3个比例系数 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 为模糊控制器整定后的输出,则PID的最终取值为

$$\begin{cases} k_p^{(m)} = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i^{(m)} = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d^{(m)} = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (5)$$

式中 k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 为 PID 的初始值。(3)式中评价指标的残差即驱动器残差电压 $e^{(m)}(n)$ 由模板加权的方法计算^[6],上述过程即为模糊 PID 的校正原理。

3 验证测试与结果分析

3.1 实验设置

在图 1 所示模型的基础上,采用如图 2 所示的硬件平台。光源采用红外激光器(波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$,输出功率 $P = 100 \text{ mW}$),光束依次经过衰减片、光栏、变形反射镜(DM)、光学组件和分光镜,分光镜将大部分光束直接通过透镜投射到远场光斑测量系统,用于测量光束校正前后的光斑特性。通过分光镜,小部分光束到达由 H-S 波前传感器、波前预处理器、波前重构及模糊控制器、DM 控制器和上位 PC 机组成的校正系统。波前预处理器(由高性能的现场可编程门阵列构成)基于高速数字信号处理器(TI C6455)实现波前重构及模糊控制,模糊解算出的电压直接输出到校正执行机构 DM 控制器。H-S 波前传感器孔径面阵为 40×40 ,变形镜驱动器数为 68。

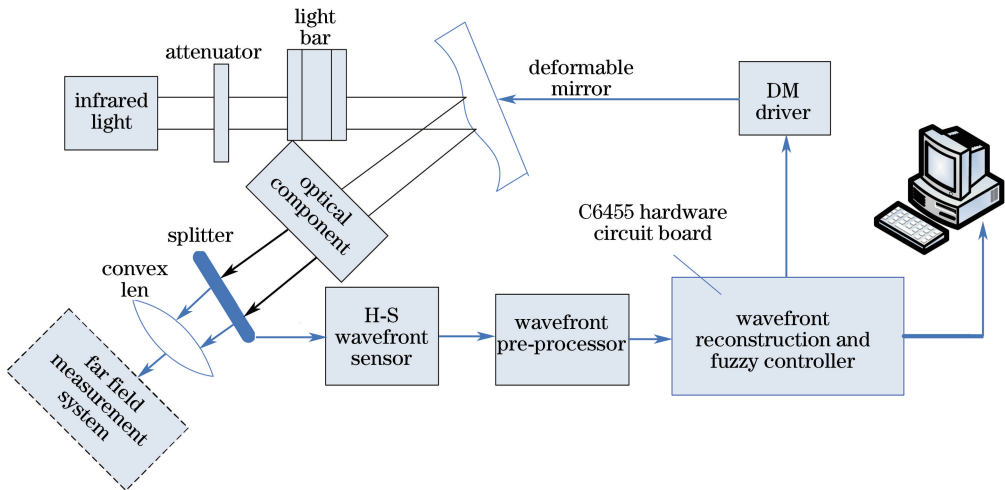


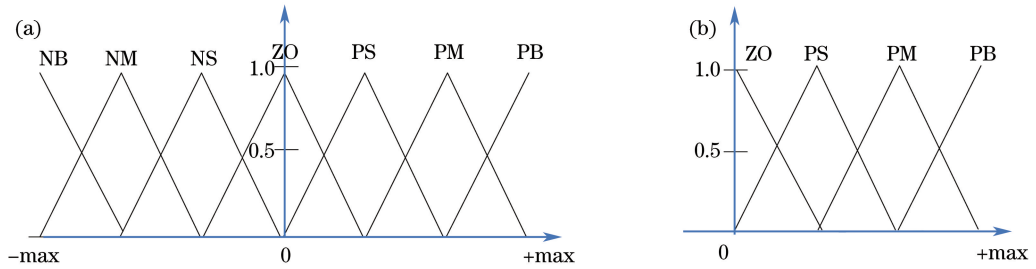
图 2 自适应光学系统中模糊控制硬件测试平台框图

Fig. 2 Diagram of fuzzy control hardware test platform in adaptive optical system

3.2 论域及规则库的选择

在实现控制算法前,首先确定论域的选取范围,本模糊控制包含输入论域 $\{E\}$ 和 $\{EC\}$ 以及输出论域 $\{K_P\}$ 、 $\{K_I\}$ 和 $\{K_D\}$ 的范围。输入论域直接由波面评价指标 J 的范围确定,假设开环时波面的评价指标矢量 J 的模的最大值为 j_{\max} ,则 $\{E\}$ 和 $\{EC\}$ 的范围均为 $[-j_{\max}, j_{\max}]$ 。将该区间划分为 7 个模糊子集,即负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)。基于本平台的测试表明,对于输出论域 $\{K\} = \{K_P, K_I, K_D\}$,不加模糊控制的常规 PID 波面校正达到稳定闭环时的参数为 $k_{p0} = 0.15$, $k_{i0} = 0.1$, $k_{d0} = 0.05$ 。输出论域的范围均小于 1,其隶属度分布采用两种情况进行实验对比,即正负对称分布的 7 个模糊子集和正分布的 5 个模糊子集。如图 3 所示,实验所有论域的隶属度均采用三角分布,两种分布对应两种不同的规则表。表 1~3 为实验总结出的两类隶属度分布的对应规则库,其中斜线左边为正分布规则库,斜线右边为正负对称分布规则库。

如图 3(a)所示,当隶属度为正负对称分布时输出论域需要初始值,即常规 PID 的闭环值 $k_{p0} = 0.15$, $k_{i0} = 0.1$, $k_{d0} = 0.05$,选定论域 $\{K\} = \{[-0.3, 0.3], [-0.1, 0.1], [-0.05, 0.05]\}$,相应规则库采用如表 1~3 所示斜线右边的规则。如图 3(b)所示,当隶属度为正分布时输出论域无需初始值,即 $k_{p0} = 0$, $k_{i0} = 0$, $k_{d0} = 0$,选定论域 $\{K\} = \{[0, 0.3], [0, 0.1], [0, 0.05]\}$,相应规则库采用如表 1~3 所示斜线左边的规则。

图3 K_P , K_I 和 K_D 的隶属度分布。(a)正负对称分布;(b)正分布Fig. 3 Membership degree distributions of K_P , K_I and K_D . (a) Positive and negative symmetrical distribution; (b) positive distribution表1 K_P 的模糊规则表Table 1 Fuzzy rule table of K_P

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PM/PB	PB/PB	PB/PM	PB/NB	PB/NB	PB/NB	PM/NB
NM	PS/PB	PM/PB	PM/PM	PM/PS	PB/PS	PM/ZO	PS/NS
NS	PM/PM	PB/PM	PB/PM	PB/PS	PB/NO	PB/NS	PM/NS
ZO	PM/PM	PB/PM	PB/PS	ZO/ZO	PB/NS	PB/NM	PM/NM
PS	PM/PS	PB/PS	PB/ZO	PB/NS	PB/NS	PB/NM	PM/NM
PM	PS/PS	PM/ZO	PM/NS	PM/NM	PM/NM	PM/NM	PS/NB
PB	PM/ZO	PB/ZO	PB/NM	PB/NM	PB/NM	PB/NB	PM/NB

表2 K_I 的模糊规则表Table 2 Fuzzy rule table of K_I

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS/NB	PS/NB	PS/NM	PS/NM	PS/NS	PS/ZO	PS/ZO
NM	PS/NB	PS/NB	ZO/NS	ZO/NS	ZO/NS	PS/ZO	PS/ZO
NS	PM/NB	PB/NS	PB/NS	PB/NS	PB/ZO	PB/PS	PM/PS
ZO	PB/NM	PB/NM	PB/NS	PB/ZO	PB/PS	PB/PM	PB/PM
PS	PM/NM	PB/NM	PB/NS	PB/ZO	PB/PS	PB/PM	PM/PM
PM	PS/ZO	PS/ZO	ZO/PS	ZO/PS	ZO/PM	PS/PB	PS/PB
PB	PS/ZO	PS/ZO	PS/PS	PS/PM	PS/PM	PS/PB	PS/PB

表3 K_D 的模糊规则表Table 3 Fuzzy rule table of K_D

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS/PS	PM/NS	PB/NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/PS
NM	PM/PS	PM/NS	PB/NB	PB/NM	PB/NM	PM/NS	PM/ZO
NS	ZO/ZO	PS/NS	PS/NM	PS/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO
ZO	ZO/ZO	ZO/NS	PS/NS	ZO/NS	PS/NS	ZO/NS	ZO/ZO
PS	ZO/ZO	PS/ZO	PS/ZO	PS/ZO	PS/ZO	PS/ZO	ZO/ZO
PM	PM/PB	PM/NS	PB/PS	PB/PS	PB/PS	PM/PS	PM/PB
PB	PS/PB	PM/PM	PB/PM	PB/PM	PB/PS	PM/PS	PB/PB

在如图2所示的平台上,需用一个光束质量非常好的标准光源对变形镜的响应矩阵即(1)式中的矩阵 B 进行标定,以供常规 PID 校正时使用。标定好后,撤出标准光源后再换上常用模拟光源。需要指出的是,标定的矩阵 B 只在一段时间内可用,过一段时间后其响应有可能不可用,矩阵 B 使用时间的长短取决于变形镜的制作工艺。由于模糊控制不需要标定,因此不用考虑这种情况。

3.3 校正结果

图4~5为一个完整的模糊校正前后的比较效果图,使用的波面评估模板为 3×3 ,输出论域采用隶属度为正分布时对应的的规则库。图4为近场波前和远场光斑校正前后的变化图,其校正效果明显。总的孔径阵列为 40×40 ,由于对周边无效网格(对校正没有影响)进行了剪切,波面显示的区域为 38×36 。图5为远场光斑质量校正前后的统计结果。远场光斑质量用衍射极限倍增因子 β 和桶中功率比 B_Q 指标来评价^[6]。校正前, β 的平均值为6.45, B_Q 的平均值为2.09;校正后, β 的平均值为1.75, B_Q 的平均值为1.25,校正效果较为明显。图中PV为峰值,rms为均方根,ave为波前残差的平均值, w 和 h 分别为H-S波前传感器有效面阵的宽和高对应的子孔径数。

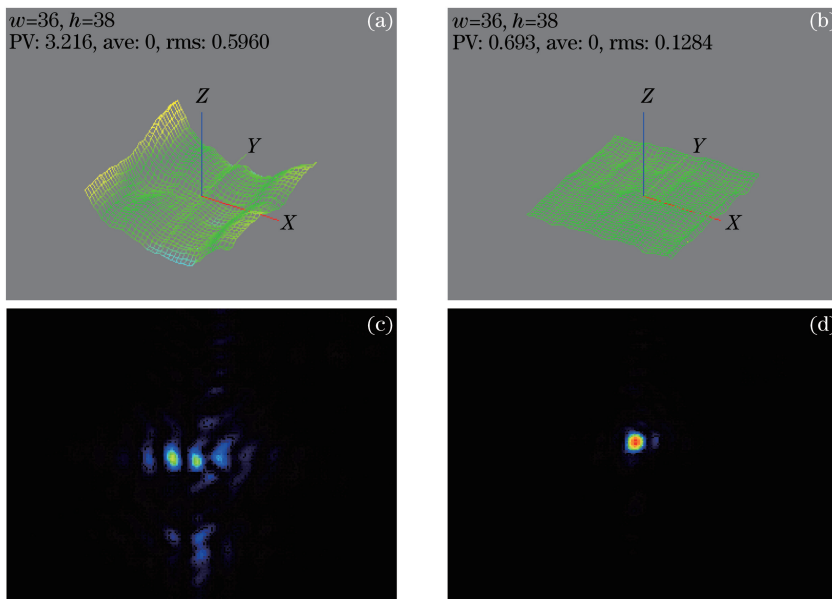


图4 模糊PID校正前后近场波前和远场光斑测试结果。(a)校正前波前;(b)校正后波前;(c)校正前远场光斑;(d)校正后远场光斑

Fig. 4 Near-field wavefronts and far-field light spots before and after fuzzy PID correction. (a) Wavefront before correction; (b) wavefront after correction; (c) far-field light spot before correction; (d) far-field light spot after correction

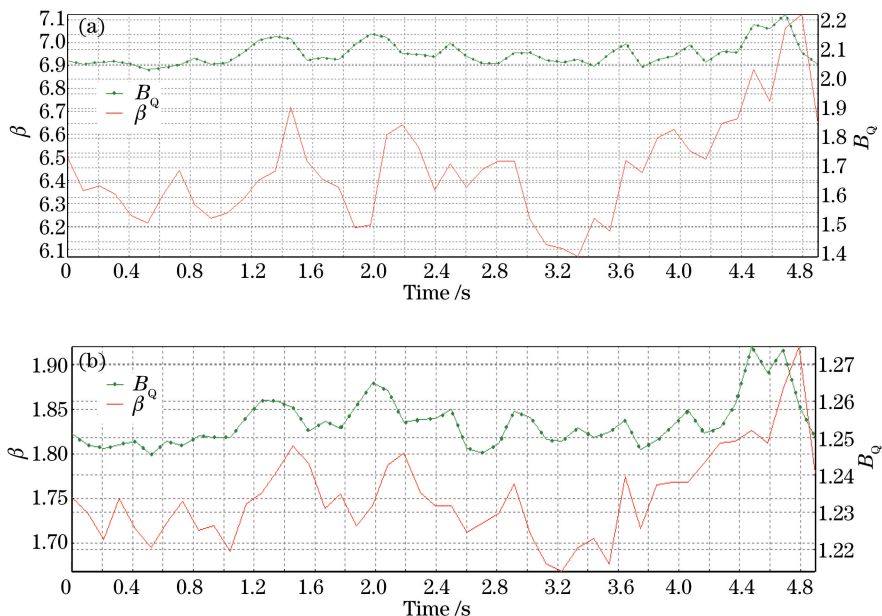


图5 模糊PID校正前后远场光斑质量统计结果对比。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 5 Comparison of far-field light spot quality statistic results before and after fuzzy PID correction.

(a) Before correction; (b) after correction

常规 PID 校正和模糊控制的显示效果区别不大,仅在指标上有所反映。表 4 为主要指标不同时闭环测试结果统计。

如表 4 所示,常规 PID 和模糊 PID 都可将开环光束的 $\beta=6.45$ 校正至 $\beta<6.45$,校正效果基本相当。就模糊控制而言,隶属度为正分布时对应的规则库与隶属度为正负对称分布时对应的规则库的校正效果大致相当,但通常隶属度为正负对称分布时对应的规则库首先需寻找常规 PID 校正时的参数 k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} ,而隶属度为正分布时对应的规则库无此要求,更为方便。对于波面评价模板的选择, 3×3 模板略好。因为模板越大,作动器周边的耦合因数作用越大,越有利于校正的稳定性,但精确度不高,故 3×3 模板和隶属度为正分布对应的规则库的实用性更好。

表 4 不同条件下的闭环测试结果统计

Table 4 Closed-loop test result statistics under different conditions

Closed-loop method	Condition				
	PID parameter	Mean value of open-loop β	Wavefront evaluation template	Membership degree distribution type	Mean value of closed-loop β
Conventional PID	$k_{p0}=0.15$	6.45	—	—	1.86
	$k_{i0}=0.1$				
	$k_{d0}=0.05$				
Fuzzy PID	$k_{p0}=0.0$	6.45	3×3	Positive distribution	1.75
	$k_{i0}=0.0$				
	$k_{d0}=0.0$	6.45	3×3	Positive and negative symmetrical distribution	1.81
	$k_{p0}=0.15$				
	$k_{i0}=0.1$	6.45	5×5	Positive distribution	1.93
	$k_{d0}=0.0$				
$k_{p0}=0.15$	6.45	5×5	Positive and negative symmetrical distribution	2.05	
$k_{i0}=0.1$					
	$k_{d0}=0.05$				

3.4 校正带宽测试

为测试模糊控制校正的有效带宽,采用帧频为 120 Hz 的 H-S 波前传感器,采集校正前后连续 1024 帧以上的波前,在 40×40 的波前上某固定坐标位置,如位置(19,19),对波前残差作连续统计(即时间轴上),并在该时间序列上作快速傅里叶变换,得到该点校正前后的波前残差频谱。图 6 为实测孔径位置为(19,19)处校正前后波前残差的频谱图。图中横坐标通过 120 Hz 的刷新频率换算为实际相位残差的响应频率,纵坐标为残差。校正前波前残差低于 10 Hz 的低阶成分较大,10 Hz 之后高阶成分逐渐变弱,此即为平台所处开环波前的真实情况。校正后,低于 5~7 Hz 的频谱基本被校正,频率高于校正前频谱下降到约为 3 dB 处对应

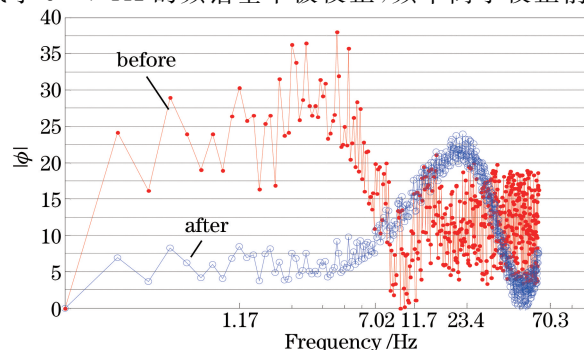


图 6 模糊 PID 校正前后波面位置坐标(19,19)处波前残差的频谱图

Fig. 6 Wavefront residual frequency spectra at wavefront position coordinate (19, 19) before and after fuzzy PID correction

频率的频谱几乎无变化;在频率约为 25 Hz 处,作动器的高频振动增加了额外的高频成分,但不足以影响光束质量。通过更多孔径位置测试,可以得到当 H-S 波前传感器刷新频率为 120 Hz 时,该方法的有效校正带宽不大于 6 Hz。

实验表明,在相同采样率条件下,常规 PID 和模糊 PID 的校正带宽都约为 6 Hz,最终的校正效果与开环时的波前质量(主要是时域上的抖动)有很大关系,如开环 β 为 11~12 时,校正后 β 只能达到 3~4。图 7 为其中一个校正结果,开环 $\beta=11.75$,抖动明显,校正后 $\beta=3.49$ 。原因在于该系统刷新频率为 120 Hz,有效校正带宽为 5~6 Hz,即模糊控制在校正有效带宽上与常规 PID 一致。

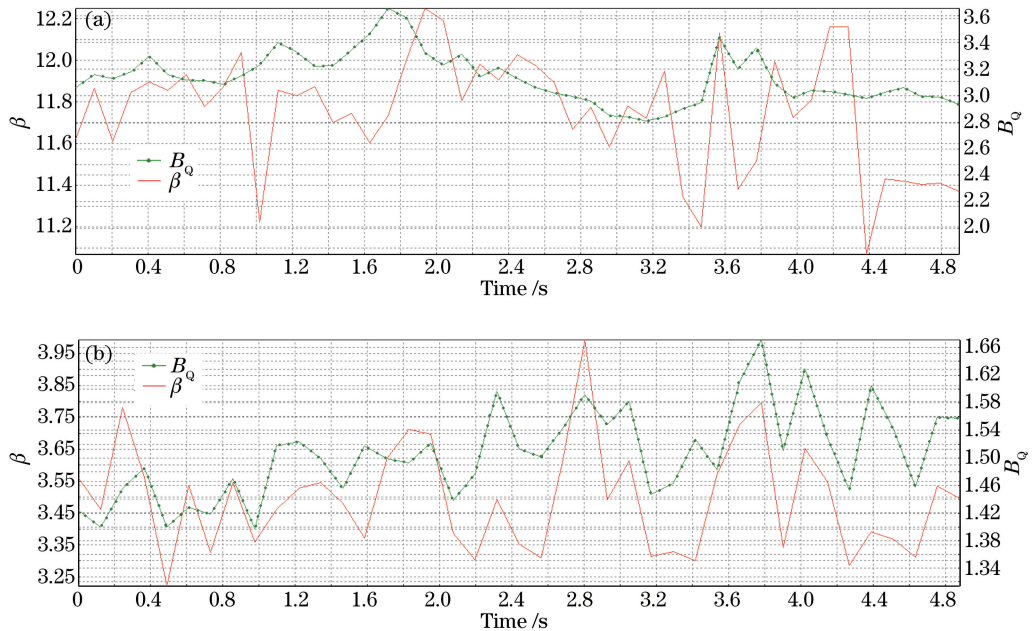


图 7 增加抖动后模糊 PID 校正前后远场光斑质量统计结果对比。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 7 Comparison of far-field light spot quality statistic results before and after fuzzy PID correction with jitter.

(a) Before correction; (b) after correction

4 结 论

模糊 PID 控制实验表明,无论是校正效果还是校正有效带宽,模糊 PID 与常规 PID 大致相当。模糊论域的选取合理,采用 3×3 的波前加权模板效果更好。对规则库的实验表明,当 PID 控制器的 3 个参数的初始值都为 0 时,输出论域采用隶属度为正分布时对应的规则库,当 3 个参数的初始值不为 0 时,输出论域应采用隶属度为正负对称分布时对应的规则库,两种规则库的校正效果一致。隶属度为正分布时对应的规则库无需寻找常规 PID 的参数,实用性更强。模糊 PID 最大的优势在于无需标定变形镜的响应矩阵,降低了光路调试的对准难度。由于模糊 PID 对参数的自动整定特性,使得系统的稳定适应性更强,是一种真正意义上的智能化自适应控制方法。

参 考 文 献

- [1] Zheng Z Y, Li C W, Li B M, *et al.* Analysis and demonstration of PID algorithm based on arranging the transient process for adaptive optics[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(11): 110101.
- [2] Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Multi-channel adaptive control algorithm for closed-loop adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301002.
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[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301002.
- [3] Tesch J, Truong T, Burruss R, *et al.* On-sky demonstration of optimal control for adaptive optics at Palomar observatory[J]. Optics Letters, 2015, 40(7): 1575-1578.
- [4] Kudryashov A, Alexandrov A, Rukosuev A, *et al.* Extremely high-power CO₂ laser beam correction[J]. Applied

Optics, 2015, 54(14): 4352-4358.

- [5] Guo Youming, Ma Xiaoyu, Rao Changhui. Optimal closed-loop bandwidth tip-tilt correction loop in adaptive optics system[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(6): 069502.
郭友明, 马晓燮, 饶长辉. 自适应光学系统倾斜校正回路的最优闭环带宽[J]. 物理学报, 2014, 63(6): 069502.
- [6] Liu Zhangwen, Li Zhengdong, Zhou Zhiqiang, *et al.* Adaptive optics correction technique based on fuzzy control[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(1): 014206.
刘章文, 李正东, 周志强, 等. 基于模糊控制的自适应光学校正技术[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 014206.
- [7] Klug M, Castelan E B, Leite V J S, *et al.* Fuzzy dynamic output feedback control through nonlinear Takagi-Sugeno models[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2015, 263: 92-111.
- [8] Liu Y J, Tong S C. Adaptive fuzzy control for a class of unknown nonlinear dynamical system[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2015, 263: 49-70.
- [9] Guo Youming, Rao Changhui, Bao Hua, *et al.* Direct computation of the interaction matrix of adaptive optics system [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(14): 149501.
郭友明, 饶长辉, 鲍 华, 等. 一种自适应光学系统响应矩阵的直接计算方法[J]. 物理学报, 2014, 63(14): 149501.
- [10] Liu Zhangwen, Xie Chuanlin, Liu Qihua, *et al.* Wave-front reconstruction based on point-by-point scanning [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1102007.
刘章文, 谢川林, 刘七华, 等. 基于逐点扫描的波前数据重构[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102007.