

基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法

郭爱林¹ 朱海东^{1*} 杨泽平² 唐仕旺¹ 谢兴龙¹ 朱健强¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)
² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 快速准确地获得变形镜各驱动器应加载的电压是自适应光学波前相位控制算法的核心研究内容。基于驱动器位置波前相位特征计算驱动器应加载的电压可以大幅降低数据计算量和收敛步数,有利于实现变形镜的高速实时控制且达到波前控制的精度要求。利用该算法建立神光 II 升级激光装置 45 驱动单元变形镜控制的计算模型,对第 2~36 项泽尼克(Zernike)多项式像差[峰谷(PV)值为 2 μm]逐项进行拟合的结果显示,收敛步数在 9 次以内驱动器位置相位控制精度即可达到 0.01 μm 。面形拟合结果显示该变形镜可对前 15 项泽尼克多项式像差进行有效控制,满足神光 II 升级激光装置对光束波前相位控制的要求。

关键词 自适应光学;变形镜;像差拟合

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0311001

Deformable Mirror Control Algorithm Based on the Phase Correction at the Actuator Position

Guo Ailin¹ Zhu Haidong¹ Yang Zeping² Tang Shiwang¹ Xie Xinglong¹ Zhu Jianqiang¹

(¹ Joint Laboratory on High-Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract One core study of adaptive optics wavefront control algorithm is to obtain the loaded voltage of each actuator rapidly and accurately. The algorithm based on the phase correction at the actuator position can dramatically reduce the data calculation, achieve the required phase precision with less convergence steps and realize the high-speed real-time control of the deformable mirror. Based on this algorithm, the calculation model for the phase control of 45 actuators deformable mirror of the SG-II update laser facility is set up. The simulation of the 2nd~36th items of Zernike polynomial aberrations [peak-to-valley (PV) value of 2 μm] shows that the phase correction precision of 0.01 μm can be achieved within 9 steps. The fitted shape of the first 15 items of Zernike polynomial aberrations shows that the aberration control ability of the deformable mirror can meet the requirements of the laser facility.

Key words adaptive optics; deformable mirror; fitting of aberration

OCIS codes 010.1080; 080.1010

1 引 言

自适应光学光束波前相位控制技术广泛应用于惯性约束核聚变高功率激光驱动器、天文望远镜以及人眼视光学等领域,用于改善光学系统的光束波

前质量^[1]。自适应光学系统一般由波前传感器、变形镜和数据采集控制器组成,其中变形镜直接参与光束波前相位的控制,而波前传感器和数据采集控制器则是为变形镜光束波前相位控制服务的。连续

收稿日期: 2012-09-10; 收到修改稿日期: 2012-11-16

基金项目: 国家 863 计划(2011AA8044010)和中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室研究发展基金资助课题。

作者简介: 郭爱林(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事高功率激光驱动器波前质量控制和超短脉冲激光等方面的研究。E-mail: gall47@163.com

* 通信联系人。E-mail: hdzhu@sio.ac.cn

表面分立驱动变形反射镜具有校正动态范围大、光能利用率高、易于抛光以及镀膜和面形连续等优点,是多数自适应光学系统的首选构型^[2]。该构型变形镜主要由薄镜面、驱动器阵列和刚性底座组成,通过调制各分立驱动器加载的电压使薄镜面产生特定的面形来实现光束波前相位的控制。变形镜的驱动面形决定了光束波前相位的控制,而驱动面形取决于各分立驱动器所加载的电压,因此自适应光学系统闭环控制的目标就是确定各分立驱动器应加载的电压^[3]。

变形镜面形控制算法一直是自适应光学系统研究的热点,其研究目的就是寻求准确、快速且稳定地确定各分立驱动器应加载电压的算法,主要包括递推最小二乘法、爬山法、遗传法、神经网络法和随机并行梯度下降法等^[4~6]。光束波前像差实时控制要求变形镜面形控制速度快于光学系统像差的变化速度,而影响变形镜面形控制速度的主要因素是算法所涉及的计算数据量。此外,由于薄反射镜耐压有限,要求变形镜控制算法具有稳定的收敛性,避免在校正时出现较大的校正力而损坏器件^[7]。

本文依据变形镜驱动面形取决于各分立驱动器加载的电压、驱动器影响函数具有近似高斯函数的形式且变形镜驱动面形基于各驱动器影响函数线性叠加的物理原理^[8],提出以各分立驱动器位置相位特征为校正目标的变形镜面形控制算法,将变形镜面形校正的二维矩阵方程组降为驱动器位置相位校正的一维向量方程组,大幅降低变形镜控制算法的数据计算量,在满足相位控制精度的前提下有利于实现变形镜面形的高速稳定控制。利用该算法建立神光 II 升级激光装置中呈正三角形排布的 45 驱动单元变形镜闭环控制计算模型,对第 2~36 项泽尼克多项式像差逐项进行拟合的结果显示,该算法具有稳定的收敛性,收敛步数在 9 次以内驱动器位置相位控制精度可达到 0.01 μm 。面形拟合结果显示该变形镜可对第 2~15 项泽尼克多项式像差进行有效控制,满足该装置对光束波前相位控制的要求。

2 原 理

在工程应用中,连续表面分立驱动变形反射镜的驱动面形 $P(x, y)$ 可描述为 n 个驱动器的光学影响函数 $I(x, y)$ 的线性加权和,其中权重系数为相应驱动器的等效控制电压 V , 即

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

式中 $P(x, y)$ 和 $I(x, y)$ 的单位均为 μm , 其中 $I(x, y)$ 为归一化光学影响函数,即驱动器位置相位归一化处理为 1 μm , 等效控制电压定义为实际控制电压与变形镜驱动器位置驱动相位为 1 μm 时电压的倍数。为便于描述和理解,下文所述电压均指等效控制电压。

驱动器光学影响函数与薄镜面的材料和厚度、驱动器的刚度和布局等因素有关,可通过逐个驱动器加压来准确测定^[8]。根据经验,驱动器光学影响函数可表示为高斯函数的形式:

$$I_i(x, y) = \exp \left\{ \ln \omega \left[\frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{d} \right]^\alpha \right\}, \quad (2)$$

式中 d 为驱动器间距, α 为高斯指数, ω 为交连值, (x_i, y_i) 为驱动器 i 位置的坐标。由(2)式可见,距离驱动器 i 间距为 d 的相邻驱动器位置光学影响函数的值为 ω , 交连值表征了驱动器间相互耦合作用的强弱。为优化变形镜对像差的拟合能力,在工程实践中高斯指数和交连值分别取 1.9~2.1 和 0.05~0.12^[9], 本文分别取高斯指数与交连值为 2 和 0.05。

由于驱动器光学影响函数系 $I(x, y)$ 不满足正交性,使得(1)式中 V 不存在精确的解析解,通常利用搜索法、插值逼近法、随机法或自适应法等计算满足一定误差条件的数值近似解。

由于驱动器光学影响函数具有高斯函数的形式,且变形镜的驱动面形为各驱动器的光学影响函数的线性加权和,可知变形镜驱动器位置相位取决于该驱动器所加载的电压和相邻驱动器的交连效应,因此可将变形镜驱动面形的求解简化为各驱动器位置相位的求解。设变形镜目标驱动面形为 $P_t(x, y)$, 驱动器加载电压为 V , 则在驱动器 i 位置相位满足

$$P_t(x_i, y_i) = V_i I_i(x_i, y_i) + \sum_{j=1}^{n(j \neq i)} V_j I_j(x_i, y_i). \quad (3)$$

(3)式具有明显的物理意义:右侧第 1 项表征驱动器 i 加载的电压对位置 (x_i, y_i) 相位校正的贡献,第 2 项表征其余驱动器加载的电压对位置 (x_i, y_i) 相位校正的交连贡献。

依据驱动面形的线性叠加以及驱动器交连关系,驱动器 i 所加载的电压可表示为该位置目标驱动相位与交连相位之差,即

$$V_i = P_t(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^{n(n \neq i)} [P_t(x_i, y_i) I_j(x_i, y_i)]. \quad (4)$$

将电压 V 加载到驱动器后, 驱动器 i 位置相位校正残差 $P_e(x_i, y_i)$ 可表示为

$$P_e(x_i, y_i) = P_t(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^n V_j I_j(x_i, y_i). \quad (5)$$

若 $P_e(x_i, y_i)$ 的最大值超过驱动器位置相位校正精度要求, 则将电压 V 进一步修正为

$$V_i = P_t(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^{n(n \neq i)} \{ [P_t(x_i, y_i) - P_e(x_i, y_i)] I_j(x_i, y_i) \}. \quad (6)$$

以变形镜驱动器位置目标驱动相位的值作为电压 V 的初始值, 对(3)~(6)式进行迭代计算, 直到驱动器位置拟合相位误差满足校正要求。

已有的变形镜控制算法都是基于面形描述的二维数据, 数据量取决于面形测量仪器的分辨率和变形镜尺寸。以通光尺寸为 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$ 的神光 II 升级激光装置变形镜为例, 利用分辨率为 $643 \mu\text{m}$ 的 Zygo 干涉仪测量面形, 为 203401 个数据。依据本文提出的算法, 驱动器位置相位数据量取决于驱动器的数目, 为 45 个数据。可见, 该算法将二维超定方程组(1)式简化为 $1 \times n$ 向量矩阵方程组(3)式, 可大幅降低方程求解的数据计算量, 从而提高变形镜的控制速度。

模拟计算结果显示, 由(3)~(6)式组成的迭代算法具有较快的收敛速度和较高的稳定性, 且计算精度高, 能较好地满足自适应光学系统对控制算法的要求。需要说明的是该算法并不局限于由(2)式所定义的高斯型驱动器光学影响函数, 亦适用于逐个驱动器加压准确测定的光学影响函数。

3 变形镜拟合泽尼克多项式像差

二维正交函数系泽尼克多项式与波前倾斜、离焦、像散、彗差、球差以及高阶像差之间有较好的对应关系^[10]。为了分析光学系统波前像差的组成, 在工程实践中通常采用泽尼克多项式来拟合波前像差 $\Phi(x, y)$:

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=1}^n [c_i Z_i(x, y)]. \quad (7)$$

由于波前像差 $\Phi(x, y)$ 可描述为各泽尼克多项式的加权和, 因此可通过分析变形镜对各阶泽尼克多项式像差的拟合来评估基于变形镜位置相位校正的变形镜控制算法的准确性和收敛速度等问题^[9]。

各应用领域的习惯和约定不同, 泽尼克多项式的排列形式并不相同, 采用文献[10]所约定的排列形式进行分析。由于连续表面分立驱动变形反射镜

的驱动面形主要由低频像差组成, 一般可用 $1 \sim 36$ 项泽尼克多项式的加权和来描述。在工程应用中, 平面波前(第 1 项)对光学系统没有实质性影响, 倾斜波前(第 2, 3 项)可由导光反射镜调整, 离焦波前(第 4 项)可由透镜组调整, 因此, 为了优化波前控制效果, 变形镜并不对所有泽尼克多项式进行控制。神光 II 升级激光装置变形镜由中国科学院光电技术研究所研制, 如图 1 所示, 由呈正三角形分布的 45 个驱动器实现 $290 \text{ mm} \times 290 \text{ mm}$ 的方形光束波前像差控制。根据激光装置波前像差控制要求, 该变形镜需要对 $4 \sim 15$ 项泽尼克多项式像差进行有效控制。

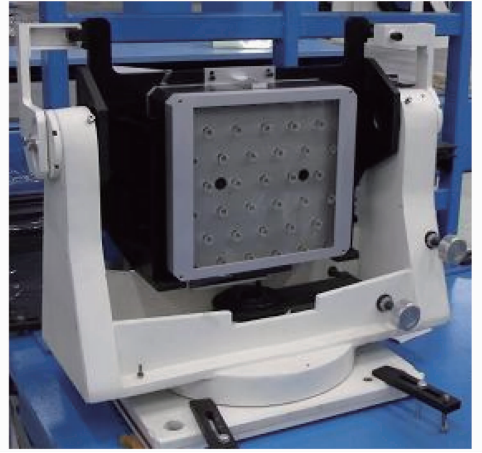


图 1 神光 II 升级激光装置变形镜

Fig. 1 Deformable mirror of the SG-II update laser facility

根据神光 II 升级激光装置变形镜的具体参数建立基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法, 逐项拟合第 $2 \sim 36$ 项泽尼克多项式像差, 对该算法的收敛性和有效性以及变形镜的光束波前相位控制能力进行评估和分析。

3.1 收敛步数

波面校正行程是衡量变形镜性能的重要参数, 变形镜闭环控制的收敛步数与校正行程有关。因此, 首先分析收敛步数与面形峰谷(PV)值的关系。为使分析更具可比性, 各泽尼克多项式像差均为 $2, 10, 20 \mu\text{m}$, 驱动器位置相位校正精度统一为 $0.01 \mu\text{m}$, 分析结果如图 2 所示。由图 2 可见, 收敛步数与校正行程有明显的关系, 行程越大, 步数越多。即使在 PV 值为 $20 \mu\text{m}$ 的大像差校正时, 仍可在 13 步之内达到所设定的校正精度。此外, 由于该算法将面形相位校正简化为驱动器位置相位校正, 使得收敛步数与泽尼克多项式的阶没有较明显的规律。

为了评估该算法在理论控制精度上的收敛情况, 对各项泽尼克多项式波前像差 PV 值均为 $2 \mu\text{m}$, 校正

精度分别为 0.1、0.01、0.001 μm 时的收敛步数进行计算,如图 3 所示。由图 3 可见,在 14 步之内,驱动器位置的相位校正精度可达到 0.001 μm 。自适应

光学系统通常采用哈特曼波前传感器进行波前采集,其测量精度一般为 0.01~0.1 μm ,利用该算法在 5~9 步之内即可达到传感器的探测精度。

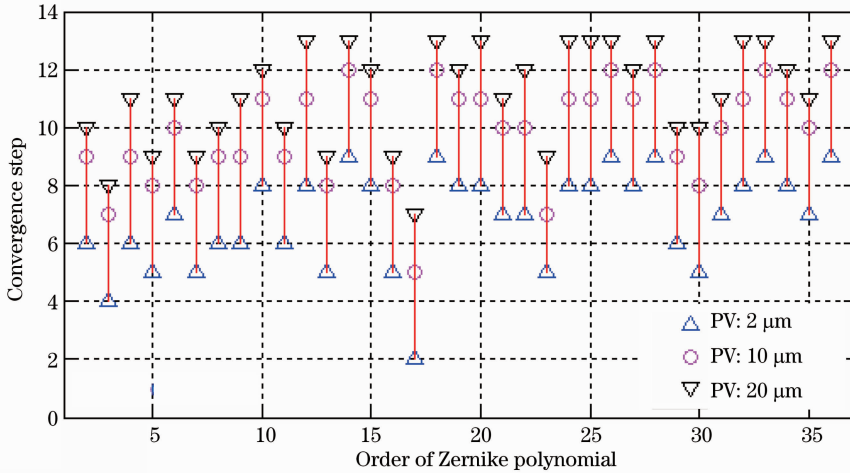


图 2 校正精度为 0.01 μm 时收敛步数与面形 PV 值的关系

Fig. 2 Relationship between convergence steps and PV values under the correction accuracy of 0.01 μm

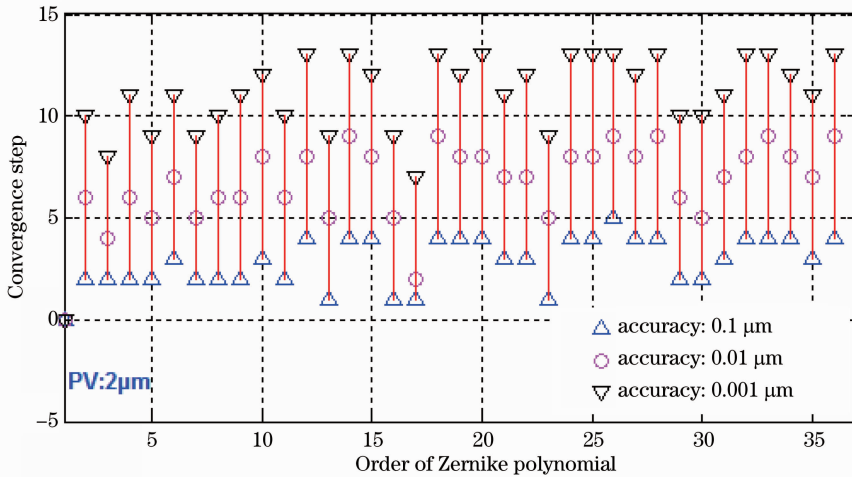


图 3 PV 值为 2 μm 时收敛步数与校正精度的关系

Fig. 3 Relationship between convergence steps and correction accuracy when PV value of 2 μm

3.2 拟合效果

基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法,驱动器位置相位校正精度可达到任意设定值,而实际校正效果应以变形镜整体相位拟合能力来评估。图 4 为对 PV 值为 2 μm 的第 6 项像散进行拟合时驱动器位置的目标相位、实际拟合相位以及驱动电压示意图,图 5 为相应的目标面形、实际拟合面形和拟合误差。计算中,驱动器位置相位校正精度要求设定为 0.01 μm ,经过 7 次收敛计算后相位拟合误差为 0.007 μm 。

尽管基于该算法可使变形镜位置相位校正精度

达到设定值,但是分立式驱动结构限制了变形镜对小尺度面形调制的拟合能力,使得拟合面形与目标面形存在小尺度调制误差,如图 5(c) 所示。由于随着泽尼克多项式阶数的增大,其小尺度面形调制增大,使得变形镜波面拟合误差加大。神光 II 升级激光装置自适应光学系统波前测量精度约为 0.1 μm ,相位校正量约 2 μm 。因此分析变形镜对 PV 值均为 2 μm ,驱动器位置相位校正精度为 0.01 μm 时,第 2~36 项泽尼克多项式像差拟合,其目标面形和实际拟合面形的 PV 值和均方根(RMS)值如图 6 所示。

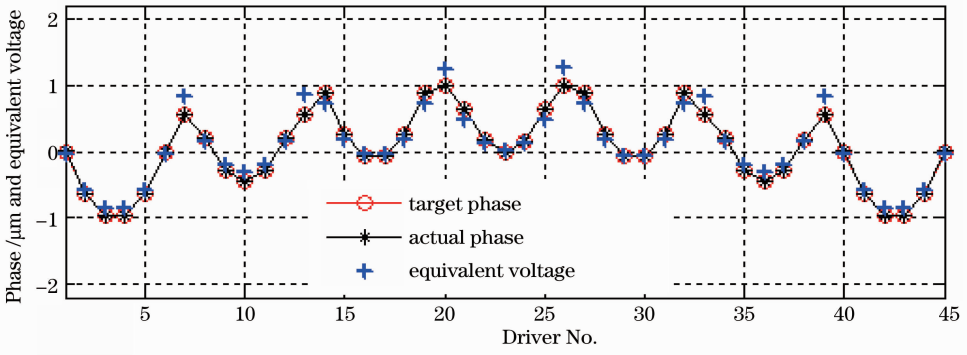


图 4 驱动器位置实际相位、目标相位及等效驱动电压

Fig. 4 Actual and target phase at the actuator position, and equivalent voltage

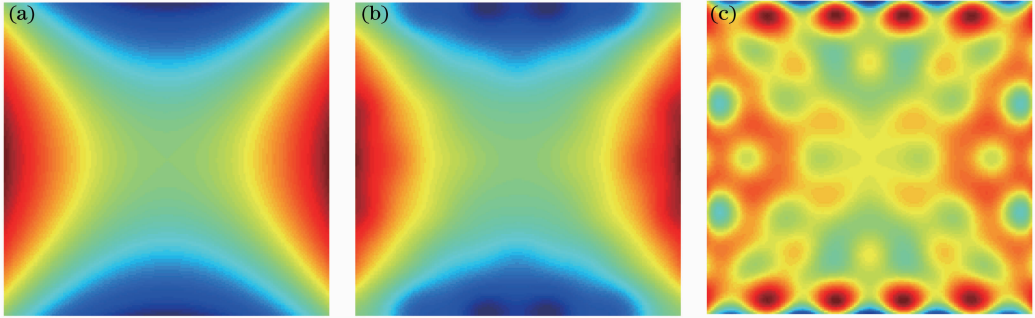


图 5 (a) 目标面形 (PV: $2 \mu\text{m}$, RMS: $0.424 \mu\text{m}$); (b) 实际拟合面形 ($1.959 \mu\text{m}$, $0.42 \mu\text{m}$); (c) 拟合误差 (PV: $0.24 \mu\text{m}$, RMS: $0.026 \mu\text{m}$, $\beta=0.06$)

Fig. 5 (a) Target shape (PV: $2 \mu\text{m}$, RMS: $0.424 \mu\text{m}$); (b) actual shape ($1.959 \mu\text{m}$, $0.42 \mu\text{m}$); (c) errors (PV: $0.24 \mu\text{m}$, RMS: $0.026 \mu\text{m}$, $\beta=0.06$)

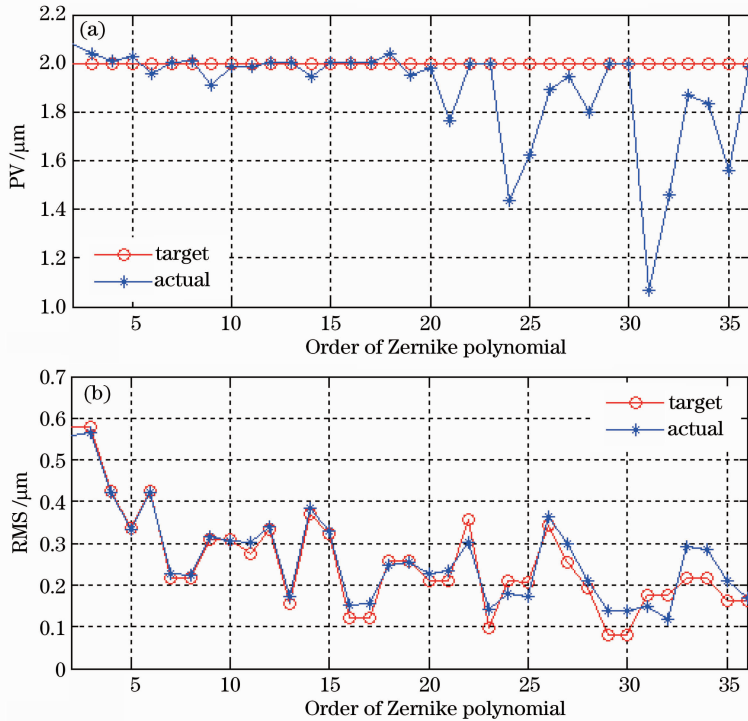


图 6 目标面形和实际驱动面形的 PV 值和 RMS 值

Fig. 6 PV and RMS of the target and the actual shape

由图 6 可见,变形镜对前 15 项泽尼克多项式像差拟合的 PV 值和 RMS 值偏差较小,满足神光 II 升级激光装置光束波前相位控制对变形镜面形拟合能力的需求。受限于变形镜有限的驱动器数目,对于 20 阶以上的泽尼克多项式像差,尽管拟合面形与目标面形在驱动器位置相位可达到设定控制精度,且波面像差形态上一致,但是由于无法有效对小尺度相位调制进行拟合,使得拟合面形的 PV 值和 RMS 值误差较大。

为了进一步评估变形镜对波前像差的拟合能力,定义拟合精度为残余波前像差 RMS 值与目标波前像差 RMS 值的比值^[9]:

$$\beta = \frac{P_{e\text{-rms}}(x,y)}{P_{t\text{-rms}}(x,y)}. \quad (8)$$

β 表征了拟合波前与实际波前在整个面上的偏差情况,如图 7 所示。由图 7 可见,对于第 2,3($n=1$) 和 4~6 项($n=2$) 泽尼克多项式像差, $\beta=0.05\sim 0.07$;对于第 7~10 项($n=3$) 泽尼克多项式像差, $\beta=0.11\sim 0.20$;对于第 11~15 项($n=4$) 泽尼克多项式像差, $\beta=0.14\sim 0.32$;对于第 16~21 项($n=5$) 泽尼克多项式像差, $\beta=0.50\sim 0.69$,拟合能力开始明显变差。因此,变形镜面形拟合能力主要取决于泽尼克多项式的径向频率参数 n ,与角向频率参数 m 没有明显的关系。

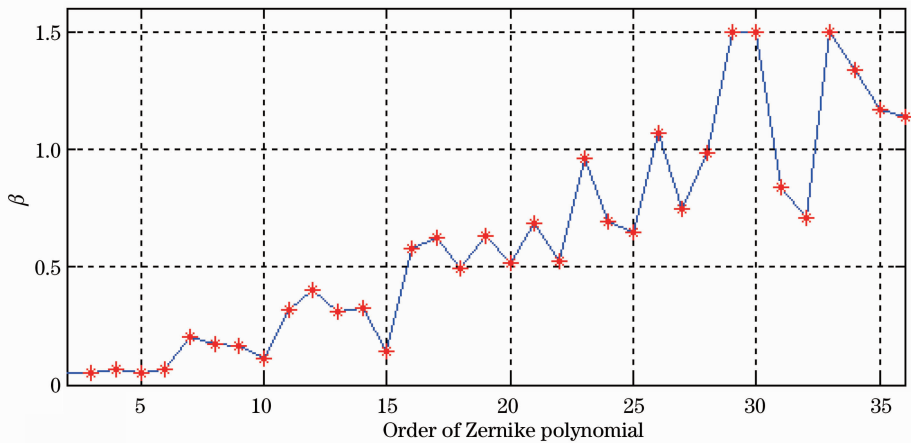


图 7 拟合精度 β

Fig. 7 Fitting precision β

4 结 论

利用变形镜驱动面形的线性叠加原理以及驱动器间的交连效应,提出以驱动器位置相位特征为校正目标的变形镜控制算法,大幅减少计算数据量,且能在较少的收敛步数下达到所设定的控制精度。基于该算法建立神光 II 升级装置 45 驱动单元变形镜计算模型,拟合泽尼克多项式像差的结果显示,可快速且稳定地获得驱动器应加载电压数据,且驱动器位置相位拟合精度达到设定值,而面形的拟合精度则取决于像差的小尺度调制和驱动器的数量及排布方式。计算结果显示神光 II 激光装置的 45 驱动单元变形镜可对第 2~15 项泽尼克多项式进行有效控制,满足激光装置对波前控制的要求。

参 考 文 献

1 Jiang Wenhan, Zhang Yudong, Rao Changhui *et al.*. Progress on adaptive optics of Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900106

姜文汉, 张雨东, 饶长辉等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900106

2 Chen Xindong, Zheng Ligong, Luo Xiao *et al.*. A deformable mirror with 9 actuated points for low order aberration correction: design and experiments [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322001

陈新东, 郑立功, 罗霄等. 校正低阶像差的 9 点促动变形镜——设计与实验 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322001

3 Shi Xiaoyu, Feng Yong, Chen Ying *et al.*. Predicting control voltages of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(6): 1281~1286

史晓雨, 冯勇, 陈颖等. 自适应光学系统变形镜控制电压预测[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(6): 1281~1286

4 Wang Caixia, Li Mei, Li Xinyang *et al.*. Real-time parallel wavefront processor for adaptive optics based on stochastic parallel-gradient-descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3076~3081

王彩霞, 李梅, 李新阳等. 基于随机并行梯度下降算法的自适应光学实时并行处理机[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3076~3081

5 Yang Ping, Ao Mingwu, Liu Yuan *et al.*. Adaptive optics genetic algorithm based on Zernike mode coefficients [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 367~372

杨平, 敖明武, 刘渊等. 基于泽尼克模式系数的自适应光学遗传算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 367~372

- 6 Yang Ping, Xu Bing, Jiang Wenhan *et al.*. Study of a genetic algorithm used in an adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1628~1632
杨平, 许冰, 姜文汉等. 遗传算法在自适应光学系统中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1628~1632
- 7 Li Hongzhuang, Wang Jianli, Lin Xudong *et al.*. Active optics experiments system with thin-mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(6): 120~125
李宏壮, 王建立, 林旭东等. 薄反射镜主动光学实验系统[J]. *光电工程*, 2009, **36**(6): 120~125
- 8 Rao Xuejun, Ling Ning, Jiang Wenhan. Experiment of measuring influence function of deformable mirror using digital interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(10): 1446~1451
饶学军, 凌宁, 姜文汉. 用数字干涉仪测量变形镜影响函数的实验研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(10): 1446~1451
- 9 Yang Huafeng. Study of Wavefront Correction Technique Based on Combinational Deformable Mirror for Improving Spatial Compensation Capability of the Adaptive Optics [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 52
杨华峰. 用于提高自适应光学系统空间校正能力的组合变形镜波前校正技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. 52
- 10 Robert J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211

栏目编辑: 王晓球