

自适应光学系统模式控制动态优化方法

李邦明^{1,2} 李常伟^{1,2} 张思炯^{1,2*}

(¹ 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)
² 中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042)

摘要 像差校正模式项数是自适应光学系统模式控制算法中的一个重要参数,其大小对补偿效果影响明显。通过对系统响应函数矩阵的奇异值分解构建像差模式空间,以不同控制项数下残余像差的均方根估计为依据确定每次校正的模式项数,提出了一种模式项数动态优化的控制方法。以 Hartmann-Shack 波前传感器和薄膜变形镜为主要部件搭建自适应光学实验系统,通过拟合不同像差验证上述控制方法,实验结果表明,和固定项模式控制方法比较,动态优化方法校正的系统残余像差更低,可明显提高自适应光学系统的空间拟合性能。

关键词 自适应光学;模式控制;动态优化方法;奇异值分解

中图分类号 TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0401005

Dynamic Optimization Method for Modal Control of Adaptive Optics System

Li Bangming^{1,2} Li Changwei^{1,2} Zhang Sijiong^{1,2}

¹ Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

² Key Laboratory of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

Abstract The number of correction modes, an important parameter for the modal control of an adaptive optics system, has a significant effect on the system performance. The mode space of aberrations is built up by the singular value decomposition of the system's response function matrix. The number of correction modes is determined by the root mean square estimation of the residual aberration obtained under different numbers of correction modes. A dynamic optimization method for modal control of adaptive optics system is proposed. An adaptive optical experimental system mainly based on a Hartmann-Shack wavefront sensor and a membrane deformable mirror is constructed. The above control method is verified by fitting different aberrations. Results show that the residual aberration with correction by the dynamic optimization method of modal control is smaller than the one with correction by the method of the fixed mode number, and the spatial fitting performance of the adaptive optics system can be obviously improved.

Key words adaptive optics; modal control; dynamic optimization method; singular value decomposition

OCIS codes 010.1080; 010.1285; 080.1010

1 引 言

控制方法是自适应光学系统研究的热点,其中模式控制方法^[1~3]将畸变像差分解为某正交像差模式的线性组合,通过对各模式补偿方式的优化,可提高系统对整体像差的补偿能力。模式控制方法与最速下降法^[4,5]、直接斜率法^[6]、随机并行梯度下降

法^[7,8]、神经网络预测方法^[9]、线性二次高斯控制方法^[10]等相比,具有计算量小且易于优化的特点,被广泛应用于自适应光学系统控制中。

像差模式的选择和滤除是模式控制算法设计的关键问题,不同的模式、模式项数和优化方法,控制效果差别明显。文献[11~14]中的模式选择方法或

收稿日期: 2011-10-17; 收到修改稿日期: 2011-11-18

基金项目: 中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项资助课题。

作者简介: 李邦明(1980—),男,在站博士后,主要从事自适应光学系统控制方面的研究。E-mail: bmli@niaot.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: sjzhang@niaot.ac.cn

者从系统响应函数矩阵本身的特性入手,或者以系统对基像差的空间校正特性为依据,在校正过程中都是选择一个固定的像差模式项数。考虑到在自适应光学系统像差补偿的过程中,畸变像差实时变化,以上两种思路都无法确定最优的校正模式项数,也不能发挥系统最优的空间补偿特性。通过对系统响应函数矩阵的奇异值分解构建变形镜可校正模式空间,以残余像差的估计为依据,对像差模式项数进行了动态优化,并提出了一种模式控制动态优化方法。实验证明,该控制方法明显提高了系统的空间拟合性能。

2 实验光路

以 Thorlab 公司 Hartmann-Shack 波前传感器

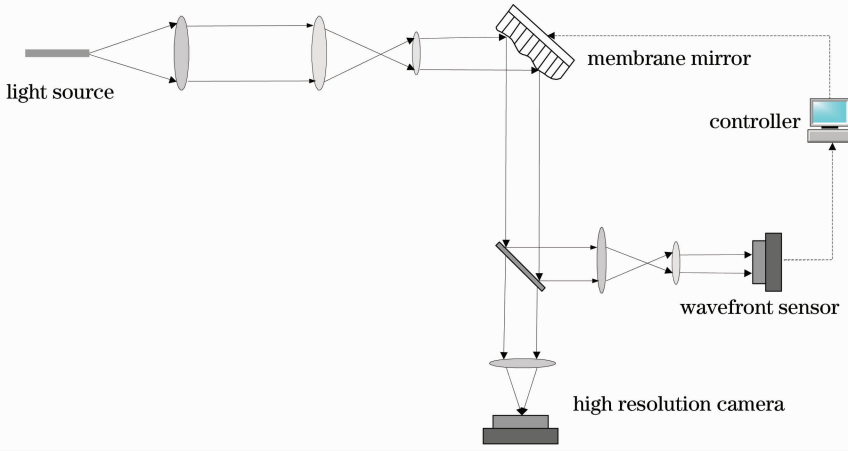


图 1 自适应光学实验系统光路图

Fig. 1 Schematic of adaptive optical experimental system

3 基于残差估计的模式控制动态优化方法

设入射畸变波前复原为 m 项(去除平移项) Zernike 模式像差的线性组合,变形镜驱动电极的数目为 n ,自适应光学系统的响应函数矩阵为 \mathbf{F} (也称为变形镜影响函数矩阵)^[17], $\mathbf{F} \in \mathbf{R}_{m \times n}$,根据矩阵奇异值分解理论^[18],可知存在正交酉矩阵 $\mathbf{U} \in \mathbf{R}_{m \times m}$, $\mathbf{V} \in \mathbf{R}_{n \times n}$,使得 $\mathbf{F} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T$,其中 $\Sigma \in \mathbf{R}_{m \times n}$ 且 $\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, r 为矩阵 \mathbf{F} 的秩, $\Sigma_r = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$, λ_i 是响应函数矩阵 \mathbf{F} 的奇异值,且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r > 0$ 。设 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n]$, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m]$, $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_m$ 表示了相互正交的像差模式。 λ_i 的大小不仅表示了产生单位基模式像差 \mathbf{u}_i 需要的控制信号的大小,而且还表示了波前传感器对基模式 \mathbf{u}_i 的探测能力, λ_i 越小,产生该模式像差需要的控制信

和 Adaptica 公司微机械薄膜变形镜为主要部件,搭建如图 1 所示的自适应光学实验系统,光源为 Thorlab 公司的单模光纤激光器,波长为 660 nm,实验系统波前传感器感光区域是 $4.76 \text{ mm} \times 4.76 \text{ mm}$,对应微透镜阵列的光斑数为 31×31 ,微透镜间距约为 $150 \mu\text{m}$,薄膜变形镜驱动电极数目为 32,对应感光区域直径为 11 mm,电极可接收的最大电压为 250 V。波前重建时,根据波前传感器 CCD 获取的子光斑图像,计算相应的质心偏移,然后按照波前复原算法^[15]将波前传感器获取的波前重建为有限项 Zernike 模式像差^[16]的组合。

号越大,变形镜对此模式的校正性能越差,波前传感器对此模式越不敏感^[19]。当 λ_i 为 0 时,变形镜对此模式像差没有校正能力,非零奇异值对应的像差模式构成了变形镜可校正像差模式空间 \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \text{span}(\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_r). \quad (1)$$

在自适应光学系统闭环控制中,模式控制采用的是部分校正的思想^[20,21],校正传感器不敏感或者校正性能较差的像差模式是没有意义的,控制算法设计时应该滤除该类模式。设第 k 次补偿像差时变形镜的控制信号为 \mathbf{s}^k , $\mathbf{s}^k \in \mathbf{R}_{n \times 1}$,设第 k 次校正后的残余像差的模式系数为 \mathbf{c}^k , $\mathbf{c}^k \in \mathbf{R}_{m \times 1}$,校正目标像差的模式系数为 \mathbf{c}_o , $\mathbf{c}_o \in \mathbf{R}_{m \times 1}$,则第 $k+1$ 次校正残差需要施加的控制信号 $\Delta\mathbf{s}^{k+1}$ 为

$$\Delta\mathbf{s}^{k+1} = \sum_{i=1}^p [\mathbf{u}_i^T (\mathbf{c}_o - \mathbf{c}^k)] (\mathbf{v}_i / \sigma_i), \quad (2)$$

式中参数 p 是像差模式保留项数,意义为滤除 p 项以后的像差模式。考虑到变形镜驱动电极控制信号

范围是有限的, 设为 $[m_1, m_2]$, (2) 式计算得到的控制信号加到驱动电极上时要考虑到信号范围的限制。为此, 定义向量函数 $\mathbf{y} = h(\mathbf{x})$, 其中 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}_{n \times 1}$, $\mathbf{y} \in \mathbf{R}_{n \times 1}$, 其对应分量 y_i 和 x_i 的关系是

$$y_i = \begin{cases} x_i & m_1 \leq x_i \leq m_2 \\ m_2 & x_i > m_2 \\ m_1 & x_i < m_1 \end{cases}. \quad (3)$$

在校正动态变化的像差时, 采用积分控制算法, 为平衡快速性和稳定性考虑, 增加一个校正步长参数 μ (积分增益), μ 在 $0 \sim 1$ 之间取值, 根据迭代闭环控制算法, 第 $k+1$ 次施加到变形镜的控制信号为

$$\mathbf{s}^{k+1} = h \left\{ \mathbf{s}^k + \mu \sum_{i=1}^p [\mathbf{u}_i^T (\mathbf{c}_o - \mathbf{c}^k)] (\mathbf{v}_i / \sigma_i) \right\}. \quad (4)$$

根据前面的分析, 保留项数 p 的选择不同, 系统对像差的校正效果不同, 参数 p 的选择与畸变波前和响应函数矩阵 \mathbf{F} 密切相关, 畸变波前是动态变化的, 对参数 p 进行动态优化可提高补偿效果。

忽略入射像差在一个控制循环内的变化, 根据变形镜控制信号和形变之间的关系, 当保留对前 p 项构造正交基模式像差的校正作用时, 第 $k+1$ 次校正后残余像差的模式系数向量 \mathbf{c}^{k+1} 为

$$\mathbf{c}^{k+1} = \mathbf{c}^k - \mathbf{F}\mathbf{s}^k + \mathbf{F}\mathbf{s}^{k+1}. \quad (5)$$

所以, 第 $k+1$ 次校正后残余像差的均方根 (RMS) 可估计为

$$\sigma_{\text{RMS}}^{k+1}(p) = \left\| \mathbf{c}^k - \mathbf{F}\mathbf{s}^k + h \left\{ \mathbf{s}^k + \mu \sum_{i=1}^p [\mathbf{u}_i^T (\mathbf{c}_o - \mathbf{c}^k)] (\mathbf{v}_i / \sigma_i) \right\} \right\|, \quad (6)$$

$\|\cdot\|$ 表示取向量的 2 范数。保留项数 p 分别取 $1, 2, \dots, r$ 时, 比较 $\sigma_{\text{RMS}}^{k+1}(1), \sigma_{\text{RMS}}^{k+1}(2), \dots, \sigma_{\text{RMS}}^{k+1}(r)$, 取其

中最小值对应的保留项数, 设为 p_o , 以 p_o 作为第 $k+1$ 次校正时像差模式保留项数, 此时的性能应该最好, 对应的变形镜驱动电极的控制信号为

$$\mathbf{s}^{k+1} = h \left\{ \mathbf{s}^k + \mu \sum_{i=1}^{p_o} [\mathbf{u}_i^T (\mathbf{c}_o - \mathbf{c}^k)] (\mathbf{v}_i / \sigma_i) \right\}. \quad (7)$$

4 实验结果及分析

在如图 1 所示的光路上, 波前复原用 35 项 (忽略第一项平移项) Zernike 多项式表示, 变形镜驱动电极的数目为 32, 以系统像差对波前传感器进行校准, 以消除系统像差对控制算法的影响, 然后分别用 (4) 式和 (7) 式计算的控制信号驱动变形镜去产生相同变化规律的像差, 比较上述算法的效果。闭环控制 60 次, 产生的不同模式组合像差变化规律为: 仅由离焦 (Z3 项) 和散光 (Z4 项和 Z5 项) 组成, 即对于 \mathbf{c}_o , 前 20 次控制时第 3、4、5 项数值大小分别设为 $0.4\lambda, 0.3\lambda, 0.3\lambda$, 第 21 ~ 40 次控制时分别设为 $-0.4\lambda, 0.3\lambda, 0.3\lambda$, 最后 20 次控制时分别设为 $-0.4\lambda, -0.3\lambda, -0.3\lambda$, 其余项在控制过程中系数始终为 0。实验结果如图 2 和图 3 所示。其中图 2 是模式项数动态优化方法和固定模式项数方法 ($p=8, p=9, \dots, p=20$) 60 次控制循环后的残余像差的 RMS 比较图, 由图 2 可以看出, 固定模式项数时, 取不同的项数, 校正效果不同, 取 10 和 12 时效果最好, 其残余像差为 0.19λ , 而动态优化方法可以使残余像差的 RMS 更小, 为 0.11λ 。图 3 为动态模式项数优化方法和最优的固定模式项数方法 ($p=12$) 在循环控制 60 次的过程中, 残余像差 RMS 的

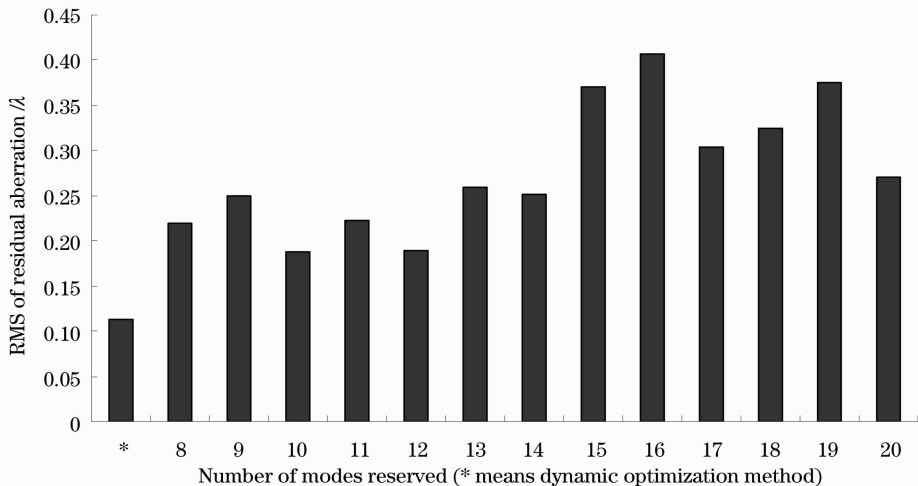


图 2 不同控制项数下残余像差 RMS

Fig. 2 RMS of residual aberration under different numbers of correction modes

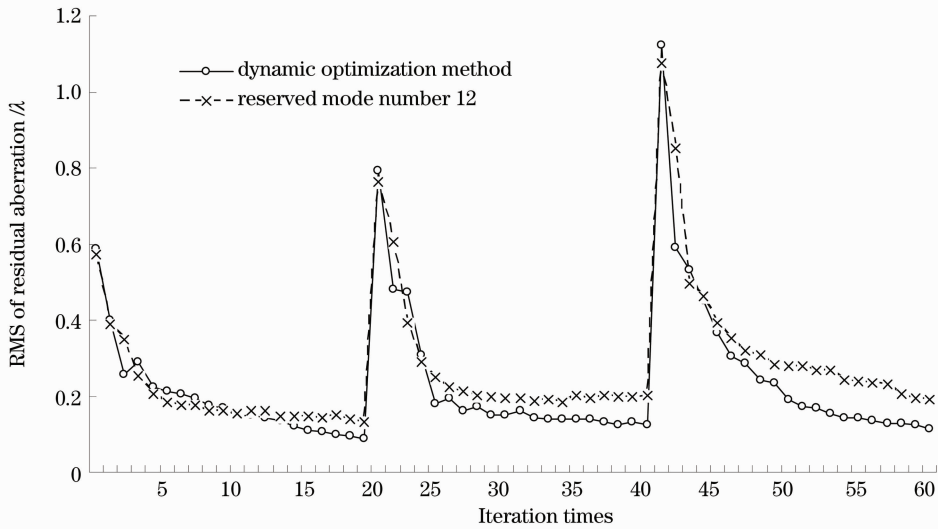


图 3 校正过程中残余像差 RMS

Fig. 3 RMS of residual aberration in process of correction

变化情况,可以看出,在整个控制过程中,动态优化方法残余像差更小,说明系统空间拟合性能更好。

动态优化算法中的响应函数矩阵以及不同模式选择项下的响应函数矩阵的分解,都可以在自适应光学系统工作之前计算保存,当自适应光学系统工作的时候,直接调用即可,实时计算量不大。实验中已经验证,增加模式优化环节后,和不优化时的校正频率几乎一样。

5 结 论

以自适应光学系统响应函数矩阵为基础,通过奇异值分解构造正交像差模式,提出了根据残余像差 RMS 估计选择保留模式项数的动态优化方法,不仅解决了固定模式项数选择难度大且繁琐的问题,而且还提高了波前拟合精度。如果在控制算法设计时,能结合畸变像差的模式分布特性和系统对基模式的时域响应特性,对各个模式的补偿带宽进行优化设计,还会进一步提高自适应光学系统的校正效果。

参 考 文 献

- 1 E. Gendron. Modal control optimization in an Adaptive Optics system[C]. Active and adaptive optics: ESO Conference and Workshop Proceedings, 1994, 187~192
- 2 M. R. Whiteley, B. M. Welsh, M. C. Roggemann. Optimal modal wave-front compensation for anisoplanatism in adaptive optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(8): 2097~2106
- 3 A. Wirth, J. Navetta, D. Looze *et al.*. Real-time modal control implementation for adaptive optics [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4586~4597
- 4 L. Zhu, P. C. Sun, D. U. Bartsch *et al.*. Adaptive control of a

- micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38** (1): 168~176
- 5 D. U. Bartsch, L. Zhu, P. C. Sun *et al.*. Retinal imaging with a low-cost micromachined membrane deformable mirror[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2002, **7**(3): 451~456
- 6 X. Li, C. Wang, H. Xian *et al.*. Zernike modal compensation analysis for an adaptive optics system using direct-gradient wavefront reconstruction algorithm [C]. *SPIE*, 1999, **3762**: 116~124
- 7 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
- 8 Zhang Jinbao, Chen Bo, Wang Caixia *et al.*. Dynamical wavefront distortion correction experiment based on stochastic parallel gradient descent algorithm for 61-element adaptive optics system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 668~673
- 张金宝, 陈 波, 王彩霞等. 61单元自适应光学系统随机并行梯度下降算法动态实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37** (3): 668~673
- 9 Yan Zhaojun, Li Xinyang. Neural network prediction algorithm for control voltage of deformable mirror in adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 911~916
- 颜召军, 李新阳. 基于神经网络的自适应光学系统变形镜控制电压预测方法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 911~916
- 10 R. N. Paschall, D. J. Anderson. Linear quadratic Gaussian control of a deformable mirror adaptive optics system with time-delayed measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32** (31): 6347~6358
- 11 E. Gendron, P. Lena. Astronomical adaptive optics. 1: Modal control optimization [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1994, **291**(1): 337~347
- 12 E. Dalimier, C. Dainty. Comparative analysis of deformable mirrors for ocular adaptive optics [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(11): 4275~4285
- 13 C. Paterson, I. Munro, J. C. Dainty. A low cost adaptive optics system using a membrane mirror [J]. *Opt. Express*, 2000, **6**(9):

175~185

- 14 E. Fernandez, P. Artal. Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(9): 1056~1069
- 15 L. Seifert, H. Tiziani, W. Osten. Wavefront reconstruction with the adaptive Shack-Hartmann sensor [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **245**(1-6): 255~269
- 16 J. Wang, D. Silva. Wave-front interpretation with Zernike polynomials [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(9): 1510~1518
- 17 R. Tyson. Principles of Adaptive Optics (Third Edition) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010. 218~222
- 18 N. Muller, L. Magaia, B. Herbst. Singular value decomposition, eigenfaces, and 3D reconstructions [J]. *SIAM Review*, 2004, **46**(3): 518~545
- 19 Li Bangming, Liao Wenhe, Shen Jianxin *et al.*. Wavefront control algorithm research on micromachined membrane deformable mirror in the human eye aberration correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 917~921
李邦明, 廖文和, 沈建新等. 微机械薄膜变形镜在人眼像差校正中的波前控制算法研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 917~921
- 20 P. Nisenson, R. Barakat. Partial atmospheric correction with adaptive optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(12): 2249~2253
- 21 V. P. Lukin, B. V. Fortes. Partial correction for turbulent distortions in telescopes [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4561~4568

栏目编辑: 谢 婧