

doi:10.3788/gzxb20154405.0511001

# 适用于波前处理器的自适应光学系统 非共光路像差补偿方法

王亮<sup>1,2</sup>, 陈涛<sup>1</sup>, 刘欣悦<sup>1</sup>, 贾建禄<sup>1</sup>, 林旭东<sup>1</sup>, 卫沛锋<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**提出了一种适合硬件形式波前处理器的非共光路像差校正方法. 讨论了非共光路像差的产生原因和运用相位差异技术检测非共光路像差的方法. 根据波前处理器的工作流程, 推导了将非共光路像差折算到波前探测器参考点偏移量的算法, 编写了实现算法的主控计算机软件模块. 在望远镜光路中以光源为目标开展实验, 用本文算法校正后, 目标能量集中度提高了 17.6%, 证明了该方法的可行性.

**关键词:**自适应光学; 像差校正; 波前处理器; 波前探测

**中图分类号:** TN911.74; TH743

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2015)05-0511001-5

## Compensation of the Non-common Path Aberrations in an Adaptive Optics System with a Wavefront Processor

WANG Liang<sup>1,2</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, LIU Xin-yue<sup>1</sup>, JIA Jian-lu<sup>1</sup>, LIN Xu-dong<sup>1</sup>, WEI Pei-feng<sup>1,2</sup>

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Non-Common Path Aberrations (NCPA) often exist in adaptive optics system, due to the discrepancy between sensing path and imaging path. A method for correcting NCPA was presented, which is very suitable for wavefront processors in forms of hardware. First, causes of NCPA were analyzed and NCPA examination with phase diversity was discussed. Then, according to the working process of wavefront processors, an algorithm which converts NCPA to reference spot shifts of the wavefront sensor was deduced, and a software module in main controller computer was programmed for implementing this algorithm. Finally, an experiment with a light source as a target was conducted in the optical path of a telescope. Experiment results show that energy concentration of the target image is increased by 17.6% approximately after NCPA correction with this method. The experiment proves that this method is capable of NCPA correction for adaptive optics system.

**Key words:** Adaptive optics; Aberration compensation; Wavefront processor; Wavefront sensing

**OCIS Codes:** 010.1080; 110.1085; 110.6770; 220.1000

## 0 引言

自适应光学(Adaptive Optics, AO)<sup>[1-3]</sup>是一种实时测量并动态校正大气湍流导致的波前畸变的技术. 自适应光学系统包括波前探测器、波前处理器和波前校

正器三部分. 波前探测器用主实时测量波前误差, 常用 Shack-Hartmann 传感器<sup>[4]</sup>, 先测量波前斜率数据, 再利用波前复原算法重构出波前相位. 波前处理器将波前探测器测量出的波前误差信息转化为波前校正器的控制信号. 波前校正器根据波前处理器输出的控制信

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(No. 2014AAXX1003X)和中国科学院第三期创新基金资助

**第一作者:** 王亮(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为数字信号处理. Email: wangliang1985\_sjtu@gmail.com

**导 师:** 陈涛(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电精密跟踪测量技术. Email: chent@ciomp.ac.cn

**通讯作者:** 刘欣悦(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光学成像及图像处理与分析. Email: sirliuxy@hotmail.com

**收稿日期:** 2014-11-28; **录用日期:** 2015-01-15

<http://www.photon.ac.cn>

号改变波前相位,实时补偿波前误差,常用变形镜作为波前校正器。

自适应光学系统非共光路像差(Non-Common Path Aberrations, NCPA)是由于波前探测器与成像相机不在同一光路引起的。尽管自适应光学系统能够校正大气湍流引起的波前畸变,然而由于非共光路像差存在,成像相机处仍然存在波前畸变。文献[5-7]通过计算机软件实现波前处理器使波前校正器产生一个相应的初始面形来补偿非共光路像差。但是,这种方法运用硬件形式的波前处理器实现时比较复杂。

在自适应光学系统中,为了满足实时性的要求,通常采用基于图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)架构、现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)架构或 FPGA 与数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)组合架构的硬件波前处理器。李大禹等<sup>[8]</sup>提出了适用于液晶自适应光学系统的基于 GPU 的波前处理器。常艳等<sup>[9]</sup>研制了用于激光光束控制的嵌入式波前处理器。彭晓峰、樊志华等<sup>[10-12]</sup>提出了基于相关算法和基于累加器的波前处理器。费玮玮等<sup>[13]</sup>设计用于观测太阳的自适应光学波前处理器系统。贾建禄等<sup>[14-17]</sup>研制了用于大口径望远镜的可扩展式波前处理器。赵雨菲等<sup>[18]</sup>设计了相应的波前处理器故障诊断系统。为了在波前处理器中方便地表示非共光路像差,降低波前处理器处理非共光路像差的复杂度,本文针对文献[14-15]中的波前处理器,提出了一种将非公光路像差折算成波前探测器参考点偏移量的方法。

## 1 自适应光学系统中的非共光路像差

### 1.1 非共光路像差的产生

在使用自适应光学系统的望远镜光路中,常常将

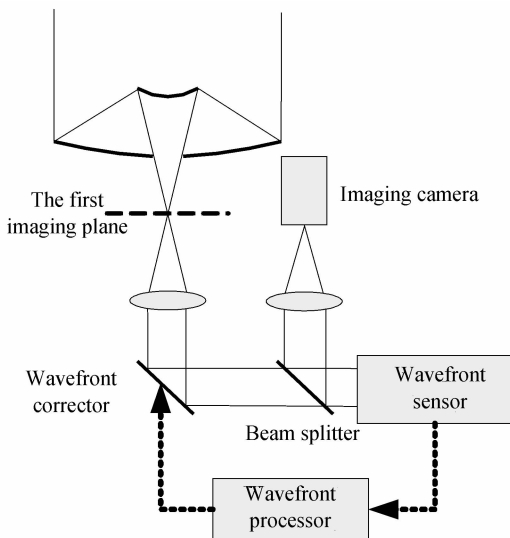


图1 使用了自适应光学系统的望远镜光路  
Fig. 1 Schematic of the optical system of an telescope with AO

波前校正器(此处为变形镜)输出的光分成两路,一路进入波前探测器(此处为 Shack-Hartmann 传感器)进行波前探测,另一路经汇聚透镜进入成像相机。由于光路不同,波前探测器处波前和成像相机处波前不一致,波前差异被定义为非共光路像差。

图1为使用自适应光学系统的望远镜光路。图中忽略了部分改变光线方向的反射面。可见,从分光镜开始,波前探测光路和成像光路不同,从而产生了非共光路像差。

### 1.2 非共光路像差的检测

由于温度、重力等因素对光路的影响,非共光路像差可能发生变化,需要在每次使用自适应光学系统前测定。汪宗洋<sup>[5]</sup>、王斌<sup>[6]</sup>、Ma<sup>[7]</sup>等分别使用相位差异技术对大口径望远镜中自适应光学系统的非共光路像差进行了检测。

本文采用同样的方法检测非共光路像差。测量时使自适应光学系统处于校正状态,利用调焦电机改变成像相机的位置,在两个(或多个)离焦量不同的位置分别采集图像,再利用已知的离焦量和采集到的图像通过最优化方法计算出非共光路像差。

## 2 波前处理器的工作原理

### 2.1 波前处理器的组成

文献[14-15]中研制的 FPGA+DSP 架构的波前处理器主要包括波前处理主板、波前处理子板和主控计算机三个部分。波前处理主板通过 Camera Link 接口与进行波前探测的相机连接,波前处理主板通过 PXI 接口插在主控计算机主板上,波前处理子板与波前处理主板通过板间总线或光纤连接。

波前处理主板对波前探测器获取的图像进行预处理,计算质心偏移量数据并发送给波前处理子板;波前处理子板进行波前控制、D/A 转换和波前拟合;主控计算机负责向波前处理主板发送控制命令、自适应光学系统标定、数据读取和存储、系统监控、故障诊断等。

### 2.2 波前处理器的工作流程

波前处理器的波前处理过程分为五步:

1) 图像处理:波前探测器 Shack-Hartmann 传感器图像的平场、暗场、阈值处理。

2) 斜率计算:计算 Shack-Hartmann 传感器各个子孔径中光斑质心,并计算光斑与参考点位置的偏移量

$$\mathbf{d} = \mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{\text{ref}} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{d}$  表示偏移量向量,  $\mathbf{r}_s$  为光斑质心位置向量,  $\mathbf{r}_{\text{ref}}$  为标定波前探测器后获得的参考点位置向量, Shack-Hartmann 传感器子孔径个数为  $m$ 。

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta x_m \\ \Delta y_m \end{pmatrix}; \mathbf{r}_s = \begin{pmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ \vdots \\ x_{sm} \\ y_{sm} \end{pmatrix}; \mathbf{r}_{\text{ref}} = \begin{pmatrix} x_{r1} \\ y_{r1} \\ \vdots \\ x_{rm} \\ y_{rm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

3)波前拟合:计算促动器误差向量  $\boldsymbol{\varepsilon}$ .

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}\mathbf{d} \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{C}$  为控制矩阵,通过标定自适应光学系统<sup>[19]</sup> 得出,变形镜促动器个数为  $n$ .

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}; \mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdots & c_{1,2m} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & c_{2,2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n,1} & c_{n,2} & \cdots & c_{n,2m} \end{pmatrix} \quad (4)$$

4)控制运算:根据促动器误差向量  $\boldsymbol{\varepsilon}$  使用 PI 控制方法计算输出电压向量  $\mathbf{v}$ .

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

5)D/A 转换:将输出电压向量  $\mathbf{v}$  经 D/A 转换后输出给电压放大器,再到波前校正器的各个通道上.

从波前处理器的波前处理过程中可以看出,使波前校正器产生一个初始面形的方法不容易在波前处理器中实现.本文提出一种将非共光路像差折算成波前探测器参考点偏移量的方法.

### 3 非共光路像差的校正

#### 3.1 非共光路像差的折算

检测出的非共光路像差  $\boldsymbol{\theta}_{ncop}$  可以表示为成像相机处的波前  $\boldsymbol{\theta}_c$  与波前探测器处的波前  $\boldsymbol{\theta}_s$  之差.

$$\boldsymbol{\theta}_{ncop} = \boldsymbol{\theta}_c - \boldsymbol{\theta}_s \quad (6)$$

$\boldsymbol{\theta}_{ncop}$ 、 $\boldsymbol{\theta}_c$  和  $\boldsymbol{\theta}_s$  为表示波前的 Zernike 系数向量,  $M$  为拟合波前使用的 Zernike 模式<sup>[20]</sup> 个数,一般取 35.

$$\boldsymbol{\theta}_{ncop} = \begin{pmatrix} \theta_{ncop1} \\ \vdots \\ \theta_{ncopM} \end{pmatrix}; \boldsymbol{\theta}_c = \begin{pmatrix} \theta_{c1} \\ \vdots \\ \theta_{cM} \end{pmatrix}; \boldsymbol{\theta}_s = \begin{pmatrix} \theta_{s1} \\ \vdots \\ \theta_{sM} \end{pmatrix} \quad (7)$$

则波前校正器应校正的像差为成像相机处的像差  $\boldsymbol{\theta}_c$ .

$$\boldsymbol{\theta}_c = \boldsymbol{\theta}_s + \boldsymbol{\theta}_{ncop} \quad (8)$$

定义 Zernike 模式导数矩阵  $\mathbf{Z}_\delta$  为

$$\mathbf{Z}_\delta = \begin{pmatrix} \frac{\partial Z_1(x_1, y_1)}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial Z_M(x_1, y_1)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_1(x_1, y_1)}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial Z_M(x_1, y_1)}{\partial y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_1(x_m, y_m)}{\partial x} & \cdots & \frac{\partial Z_M(x_m, y_m)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_1(x_m, y_m)}{\partial y} & \cdots & \frac{\partial Z_M(x_m, y_m)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$Z_1, \dots, Z_M$  代表第 1 个到第  $M$  个 Zernike 模式;而  $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$  代表第 1 个到第  $m$  个瞳孔坐标.式(8)两端左乘 Zernike 导数矩阵  $\mathbf{Z}_\delta$  可得

$$\mathbf{d}' = \mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{ref} + \Delta \mathbf{r}_{ncop} \quad (10)$$

式中  $\mathbf{d}'$  为考虑了非共光路像差的质心偏移量;  $\mathbf{r}_s$  为波前探测器测得的子孔径质心向量;  $\mathbf{r}_{ref}$  为用标准平面波

(如干涉仪发出的平行光)标定波前探测器时得到的子孔径质心向量;  $\Delta \mathbf{r}_{ncop}$  为非共光路像差引起的质心偏移量,计算公式为

$$\Delta \mathbf{r}_{ncop} = \mathbf{Z}_\delta \boldsymbol{\theta}_{ncop} \quad (11)$$

这样,可以定义修正的参考点向量  $\mathbf{r}'_{ref}$  为

$$\mathbf{r}'_{ref} = \mathbf{r}_{ref} - \Delta \mathbf{r}_{ncop} \quad (12)$$

主控计算机可以根据测得的非共光路像差  $\boldsymbol{\theta}_{ncop}$  事先算出  $\mathbf{r}'_{ref}$  并发送给波前处理器,实时校正时,波前处理器根据实时计算出的光斑质心  $\mathbf{r}_s$ . 利用式(13)计算出  $\mathbf{d}'$ , 并将其代入式(3)中实时计算促动器误差向量,并得到促动器输出电压.

$$\mathbf{d}' = \mathbf{r}_s - \mathbf{r}'_{ref} \quad (13)$$

#### 3.2 校正算法的软件实现

在 Visual Studio 2008 中使用 C++ 编写运行在工控计算机上的自适应光学系统操控软件.软件中包含了非共光路像差的输入界面和计算模块.可以根据输入的非共光路像差计算修正的参考点  $\mathbf{r}'_{ref}$ , 并发送给波前处理器.图 2 为输入非共光路像差的软件界面.



图 2 非共光路像差设置界面

Fig. 2 UI for configuring non-common optical path aberrations

算法流程为:1)根据输入的非共光路像差  $\boldsymbol{\theta}_{ncop}$  计算质心偏移量  $\Delta \mathbf{r}_{ncop}$ ; 2)根据载入的参考点图像计算参考点  $\mathbf{r}_{ref}$ ; 3)根据参考点  $\mathbf{r}_{ref}$  和质心偏移量  $\Delta \mathbf{r}_{ncop}$  计算修正的参考点  $\mathbf{r}'_{ref}$ ; 4)将修正的参考点发送给波前处理器.

## 4 实验

在望远镜的第一像面处(如图1)放置作为观测目标的光源.在自适应光学系统中,用有效子孔径数为137( $m=137$ )的 Shack-Hartmann 波前探测器和通道数为137( $n=137$ )的变形镜波前校正器.首先按照文献[5-7]的方法对非共光路像差进行检测.表1中列出了需要校正的非共光路像差(忽略了绝对值小于0.01的其它像差).

表1 实验中加入的非共光路像差

Table 1 NCPA values used in NCPA correction experiment

Zernike mode	Value(in wavelength)
Z[3, +1]	-0.04
Z[3, -1]	0.05
Z[4, 0]	0.06

然后,采用本文的校正算法进行 NCPA 校正,成像相机对光源的成像结果见图3.在图3中,为了能够清楚地看清实验效果,对图像进行了灰度拉伸.成像相机对光源成像的能量分布图见图4.根据图像计算得

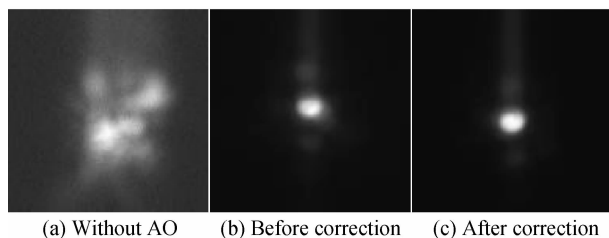
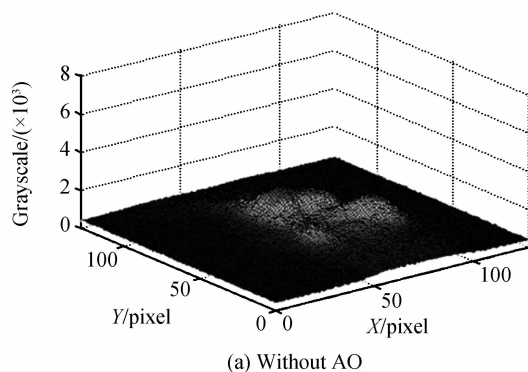
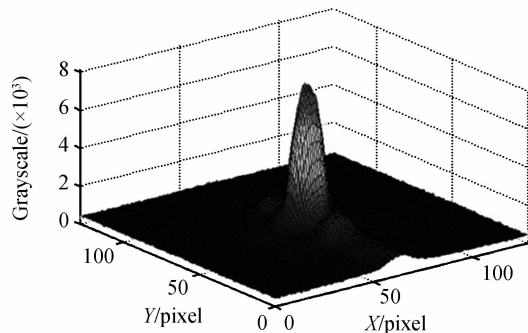


图3 非共光路像差校正实验光源成像结果

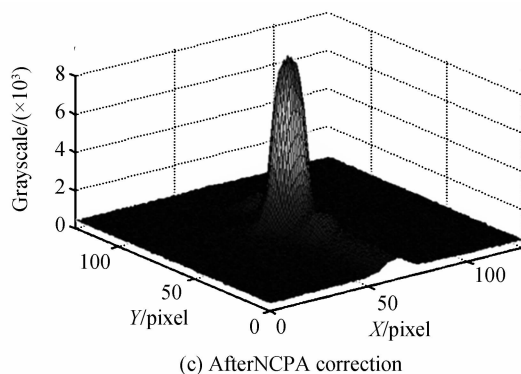
Fig. 3 Light source images from NCPA correction experiment



(a) Without AO



(b) Before NCPA correction



(c) After NCPA correction

图4 非共光路像差校正实验成像能量分布

Fig. 4 Energy distribution of images from NCPA correction experiments

出,校正后光源成像的能量集中度提高了约17.6%.从图像上也可以看出,光源的虚边得到了校正.

为了进一步验证算法的有效性,本文利用傅里叶光学原理进行仿真.以校正后的图像为原始图像,利用非共光路像差生成点扩散函数并与原始图像卷积,获得带有非共光路像差的图像.原始图像的能量集中度比仿真得到的图像提高约23.5%.与实验结果基本符合.

## 5 结论

波前探测器和成像相机不在同一光路会引起自适应光学系统中的非共光路像差.对于硬件实现的波前处理器,本文提出了一种将非共光路像差折算成波前探测器参考点偏移量的方法.实验表明,该方法能够方便地表示非共光路像差,不需要对现有硬件语言编写的波前处理器程序作出改变,因而很适合波前处理器校正非共光路像差.

### 参考文献

- [1] JIANG Wen-han. Adaptive optical technology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, **28**(1): 7-13.  
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2006, **28**(1): 7-13.
- [2] JIANG Wen-han, ZHANG Yu-dong, RAO Chang-hui, 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.
- [3] ZHAO Xin, MA Cai-wen. Research on nonsmooth  $h^\infty$  control for the adaptive optics system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0901003.  
赵欣, 马彩文. 自适应光学系统的非光滑  $H^\infty$  控制研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0901003.
- [4] WU Jia-jie, CHEN Jia-bi, XU An-cheng. Focal length measurement based on hartmann-shacke principle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 912-915.  
吴佳杰, 陈家璧, 徐安成, 等. 基于哈特曼-夏克波前测量原理的焦距测量[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 912-915.
- [5] WANG Zong-yang, WANG Bin, WU Yuan-hao, et al. Calibration of non-common path static aberrations by using phase diversity technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**

- (7): 0701007.  
汪宗洋, 王斌, 吴元昊, 等. 利用相位差异技术校准非共光路静态像差[J]. 光学学报, 2012, **32**(7): 0701007.
- [6] WANG Bin, WANG Zong-yang, WU Yuan-hao, *et al.* Calibration of no-common path aberration in AO system using multi-channel phase-diversity wavefront sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(7): 1683-1692.  
王斌, 汪宗洋, 吴元昊, 等. 利用多通道相位差异波前探测法检测自适应光学系统非共光路像差[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(7): 1683-1692.
- [7] MA Xin-xue, WANG Jian-li, WANG Bin, *et al.* Phase diversity for calibrating noncommon path aberrations of adaptive optics system under nonideal measurement environment [J]. *Optik*, 2014, **125**: 5029-5035.
- [8] LI Da-yu, HU Li-fa, MU Quan-quan, *et al.* Wavefront reconstruction calculation of liquid crystal adaptive optics based on GPU [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1643-1647.  
李大禹, 胡立发, 穆全全, 等. 基于 GPU 的液晶自适应光学波前重构计算 [J]. 光子学报, 2008, **37**(8): 1643-1647.
- [9] CHANG Yan, ZHOU Zhi-qiang, LÜ Yang, *et al.* Design of embedded wavefront process and control system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(S0): 67-70.  
常艳, 周志强, 吕阳, 等. 嵌入式波前处理与控制系统设计 [J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(S0): 67-70.
- [10] FAN Zhi-hua, WANG Chun-hong, JIANG Wen-han. Accumulator-based wavefront slope processor for Shack-Hartmann sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(3): 501-507.  
樊志华, 王春鸿, 姜文汉. 基于累加器的哈特曼-夏克波前斜率处理器 [J]. 光学精密工程, 2011, **19**(3): 501-507.
- [11] FAN Zhi-hua, WANG Chun-hong, CHEN Lin-hui. Implementation of the correlating shack-hartmann processor for the point source based on gaussian reference spot [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(6): 42-48.  
樊志华, 王春鸿, 陈林辉. 基于高斯光斑的相关 HS 波前斜率处理器 [J]. 光电工程, 2010, **37**(6): 42-48.
- [12] PENG Xiao-feng, LI Mei, RAO Chang-hui. Design of correlating hartmann-shack wavefront processor based on absolute difference algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(12): 18-22.  
彭晓峰, 李梅, 饶长辉. 基于绝对差分算法的相关 HS 波前处理器设计 [J]. 光电工程, 2008, **35**(12): 18-22.
- [13] FEI Wei-wei, WANG Chang-qing, LIU Pu-kun, *et al.* The design of large array solar adaptive optics electronic system for observation of low contrast extended object [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, **32**(12): 2987-2992.  
费玮玮, 王长清, 刘濮鲲, 等. 应用于低对比度扩展目标观测的大型阵列太阳自适应光学电子系统的设计与实现 [J]. 电子与信息学报, 2010, **32**(12): 2987-2992.
- [14] JIA Jian-lu, WANG Jian-li, ZHAO Jin-yu, *et al.* Adaptive optical wavefront processor based on FPGA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1716-1722.  
贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机 [J]. 光学精密工程, 2011, **19**(8): 1716-1722.
- [15] JIA Jian-lu, WANG Jian-li, ZHAO Jin-yu, *et al.* Hardware design for extendible adaptive optics system wavefront processor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2011, **26**(3): 370-373.  
贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 可扩展式自适应光学系统波前处理器的硬件设计 [J]. 液晶与显示, 2011, **26**(3): 370-373.
- [16] JIA Jian-lu, WANG Jian-li, ZHAO Jin-yu, *et al.* 961-element adaptive optical wavefront processor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1387-1393.  
贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 961 单元自适应光学系统波前处理器 [J]. 光学精密工程, 2013, **21**(6): 1387-1393.
- [17] JIA Jian-lu, WANG Jian-li, ZHAO Jin-yu, *et al.* Optimization of adaptive optical wavefront algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4): 1026-1031.  
贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 自适应光学系统波前处理算法的优化 [J]. 光学精密工程, 2013, **21**(4): 1026-1031.
- [18] ZHAO Yu-fei, WANG Jian-li, JIA Jian-lu, *et al.* Fault diagnostic system for adaptive optical wavefront processor [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, **21**(4): 69-72.  
赵雨菲, 王建立, 贾建禄, 等. 自适应光学波前处理器的故障诊断系统设计 [J]. 电光与控制, 2014, **21**(4): 69-72.
- [19] LI Xin-yang, JIANG Wen-han. Comparing between zonal reconstruction algorithms and modal reconstruction algorithms in adaptive optics system [C]. SPIE, 2002, **4825**: 121-130.
- [20] WANG Liang, CHEN Tao, LIU Xin-yue, *et al.* Fast algorithm of Zernike mode and its application in adaptive optics [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, **28**(11): 1282-1287.  
王亮, 陈涛, 刘欣悦, 等. Zernike 模式快速算法及其在自适应光学中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, **28**(11): 1282-1287.