

文章编号: 0258-7025(2008)03-0367-06

# 基于泽尼克模式系数的自适应光学遗传算法

杨 平<sup>1,2</sup> 敖明武<sup>1,2</sup> 刘 渊<sup>1,2</sup> 许 冰<sup>1</sup> 姜文汉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; <sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 为了提高遗传算法(GA)控制的自适应光学(AO)系统的收敛性能,建立了一套新型的基于泽尼克(Zernike)模式系数的 19 单元自适应光学系统模型。在优化过程中,遗传算法不直接优化变形镜(DM)19 个驱动器上的电压值,而是优化前 10 阶泽尼克模式系数。推导出 19 个电压值与前 10 阶泽尼克模式系数之间的关系矩阵,并进行了对比数值仿真。结果表明,该系统能够更好地校正固体激光器系统输出光束的波前像差。相对于直接优化变形镜电压值的无波前自适应光学系统,该自适应光学系统能够将遗传算法的收敛速度提高 5 倍以上。

**关键词** 自适应光学;收敛速度;关系矩阵;遗传算法;变形镜

**中图分类号** TP 202+.7 **文献标识码** A

## Adaptive Optics Genetic Algorithm Based on Zernike Mode Coefficients

Yang Ping<sup>1, 2</sup> Ao Mingwu<sup>1,2</sup> Liu Yuan<sup>1,2</sup> Xu Bing<sup>1</sup> Jiang Wenhan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
(<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** To improve the convergence speed of adaptive optics (AO) system controlled by genetic algorithm (GA), a new 19-element AO system model based on GA is set up. The system chooses the first 10-order Zernike mode coefficients on the deformable mirror (DM) as the optimization function, rather than the 19 voltages on the DM. The transform matrix between the 19 voltages and the first 10-order Zernike mode coefficients was deduced and comparative mathematic simulations were done. The simulation shows that the correction ability of the proposed AO system is much better than that optimizing the 19 voltages. Moreover, compared with the GA optimizing DM voltages, the convergence speed of GA optimizing Zernike mode coefficients is improved by more than five times.

**Key words** adaptive optics; convergence speed; transform matrix; genetic algorithms; deformable mirror

## 1 引 言

一个典型的自适应光学(AO)系统主要由波前复原、波前重构和波前校正三部分组成<sup>[1~3]</sup>。其中,波前探测器应用比较广泛的是哈特曼波前传感器,波前复原最常用的算法是直接斜率法<sup>[3]</sup>,而变形镜(DM)则是最常用的波前校正器件。而在无波前探测器自适应光学系统中,常用一个光电器件代替波前传感器,一般以光电器件上远场光强信号的强弱作为判定被补偿系统像差校正情况的标准:当光电探测器上的光强信号最大时,波前校正器对系统像

差的补偿就达到最佳。1985年,“神光 I”激光核聚变装置的波前校正系统就是采用这一原理<sup>[2]</sup>。近年来,这种无波前探测器的自适应光学系统已经成功地应用在校正共焦荧光显微镜系统像差<sup>[4]</sup>,优化单模光纤系统耦合效率<sup>[5]</sup>等领域。尽管无波前探测器的应用领域不同,但是这类系统的共同特点是需要选择适当的优化算法去搜寻系统目标指标的最优值。遗传算法(GA)是一种借鉴达尔文“适者生存”进化原理的全局搜索算法,研究表明只要参数选择得当,遗传算法总能以 100% 的概率找到问题的最

收稿日期:2007-08-16; 收到修改稿日期:2007-09-21

基金项目:国家 863 计划(A05K003)资助项目。

作者简介:杨 平(1980—),男,四川人,博士研究生,主要从事自适应光学技术和遗传算法等方面研究。

E-mail: pingyang2516@163.com

导师简介:许 冰(1960—),男,四川人,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学等方面的技术研究。

E-mail: bingxu@ioe.ac.cn

优值。基于其全局优势,遗传算法越来越广泛地应用在无波前自适应光学系统中<sup>[6~8]</sup>。一般来说,在利用遗传算法控制变形镜的自适应光学系统中<sup>[5,6]</sup>,遗传算法要优化的变量是变形镜驱动器背后的电压。每个电压看作一个变量,因此,有多少个驱动器单元就有多少个变量要优化。随着变形镜驱动器个数的增加,优化空间呈几何级数增大。例如,对于19单元变形镜而言,假如驱动器上可以施加的电压范围为 $[-200\text{ V}, 200\text{ V}]$ ,驱动器电压变化的步长约为1 V,则其搜索空间也能达到 $400^{19}$ 个,而对于驱动器数量很大(例如上百个)的变形镜,变形镜要搜索的空间就更加庞大了。所以,如果能有针对性地减少算法优化的变量个数,就能缩小算法的搜索空间,提高算法的收敛性能。

为了加快遗传算法收敛速度,本文提出一种优化变形镜驱动器上的泽尼克(Zernike)模式系数的遗传算法,讨论了该方法的原理,并通过数值仿真计算分析研究了基于这种方法的无波前探测器自适应光学系统的性能。

## 2 理论基础

根据本文所采用的19单元压电式反射变形镜(以下简称为变形镜)的工作原理<sup>[5]</sup>,对变形镜驱动器施加电压,变形镜就能产生一个相应的波前相位

$$\varphi(x, y) = \sum_{j=1}^n v_j V_j(x, y), \quad (1)$$

式中 $v_j$ 为第 $j$ 个驱动器上所施加的控制电压, $V_j(x, y)$ 为第 $j$ 个驱动器上施加单位控制电压后对光束波前的影响函数, $n$ 为变形镜的驱动器个数。

圆域内的一个完整波前 $\varphi(x, y)$ 可以由一组在圆域内正交的泽尼克多项式表示,如果对入射波前的相位分布进行数学分解,则可以把变形镜波前相位信息表示成泽尼克模式系数和泽尼克多项式的组合

$$\varphi(x, y) = b_0 + \sum_{k=1}^m b_k Z_k(x, y), \quad (2)$$

式中 $b_0$ 为波前整体平移项, $m$ 为泽尼克多项式的阶数; $b_k$ 为第 $k$ 项泽尼克多项式的模式系数; $Z_k(x, y)$ 为第 $k$ 项泽尼克多项式。

考虑到利用遗传算法不论是优化电压还是优化泽尼克的模式系数,最终改变的都是变形镜的面型,而与变形镜面型直接相关的还是其背后各个驱动器的电压值,因此,在优化模式系数的时候,必须把模式系数转化为各个驱动器的电压值。而要把模式系

数转化为驱动器的电压值就必须知道模式系数与驱动器电压值之间的关系,根据(1),(2)式,可以得到

$$\sum_{j=1}^n v_j V_j(x, y) = b_0 + \sum_{k=1}^m b_k Z_k(x, y), \quad (3)$$

因为泽尼克多项式的第一项,即平移项 $b_0$ 对波前相位的远场集中度没有影响,所以在实际中一般把该项去掉,则(3)式可以写成

$$\sum_{j=1}^n v_j V_j(x, y) \approx \sum_{k=1}^m b_k Z_k(x, y), \quad (4)$$

根据对各个泽尼克多项式施加单位系数时对各个驱动器电压的影响,可以建立起驱动器电压和泽尼克模式系数的关系矩阵

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, \quad (5)$$

(5)式可以记为

$$\mathbf{V} = \mathbf{U}\mathbf{B}. \quad (6)$$

为了合理选取泽尼克模式的阶数,仿真研究了19单元压电变形镜的校正能力。图1为19单元变形镜的校正能力曲线图。可以看出,该变形反射镜只对泽尼克多项式前10阶有较好的校正效果,所以在求关系矩阵 $\mathbf{U}$ 时,取前10阶泽尼克模式系数作为基底就已足够。

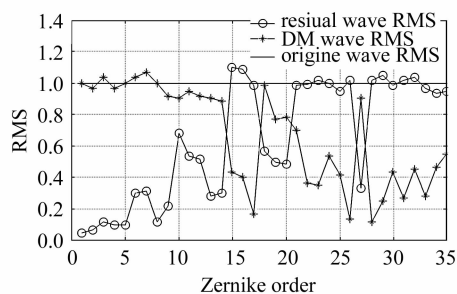


图1 19单元变形镜的校正能力曲线

Fig. 1 Correction ability curve of 19-element DM

考虑到变形镜的行程量有限( $\pm 2\ \mu\text{m}$ )<sup>[7]</sup>,如果泽尼克模式系数太大,变形镜就无法校正泽尼克多项式表征的波前像差,所以,在求解关系矩阵 $\mathbf{U}$ 时将前10阶泽尼克模式系数都取为0.1。在仿真求解过程,设仿真所取的网格大小为 $100 \times 100$ ,则变形镜每个驱动器的影响函数矩阵 $\mathbf{V}_j(x, y)$ ( $j = 1, 2, \dots, 19$ )也为 $100 \times 100$ 的矩阵,19个驱动器的影响函数可以统一改写成 $10000 \times 19$ 的矩阵形,用 $\mathbf{V}(x, y)$ 表示。为了求出 $\mathbf{U}$ ,依次利用各项系数为0.1的在单位圆域内正交的前10阶泽尼克多项式产生一个 $100 \times 100$ 的初始面型矩阵 $\xi(x, y)$ ,然后把该矩阵转

化为  $10000 \times 1$  的列向量, 用  $\boldsymbol{\psi}(x, y)$  表示。电压向量表示为  $\boldsymbol{u}$ , 则由(4)式可得到

$$\mathbf{V}(x, y)\boldsymbol{u} \approx \boldsymbol{\psi}(x, y), \quad (7)$$

给定  $\boldsymbol{\psi}(x, y)$  和  $\mathbf{V}(x, y)$  后, 就能求出各阶泽尼克多项式模式系数分别取 0.1 时与 19 个驱动器电压之间的关系向量

$$\boldsymbol{u}_{19 \times 1} = \mathbf{V}(x, y)^+ \boldsymbol{\psi}(x, y), \quad (8)$$

$\mathbf{V}(x, y)^+$  为  $\mathbf{V}(x, y)$  的广义逆矩阵, 那么, 变形镜 19 个驱动器电压和前 10 阶泽尼克多项式模式系数之间的关系矩阵就可以通过运算 10 次(8)式得到

$$\mathbf{U} = [u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_{10}], \quad (9)$$

式中  $\boldsymbol{u}_i (i = 1, 2, \dots, 10)$  为  $19 \times 1$  的向量。(9)式就是所需要的 19 单元变形镜驱动器电压和前 10 阶泽尼克模式系数之间的关系矩阵。关系矩阵确立后, 遗传算法需要优化的是 10 个泽尼克模式系数而不再是 19 个驱动器上的电压, 这就将优化变量空间减少了近一半。值得注意的是, 由于前 10 阶泽尼克模式系数取的值为 0.1, 所以根据(6)式求出的电压必须乘以 10 才是真正需要施加在变形镜上的电压。

压电变形镜的驱动器电压与其表面形变量基本成线形关系, 而通过建立关系矩阵, 又知道泽尼克多项式系数与驱动器电压也基本成线形关系, 因此, 变形镜的形变量与泽尼克多项式系数也基本成线形关系, 能够较准确地对应。本算法的物理本质和目的就在于: 在缩小遗传算法搜索空间的同时不破坏算法的全局性, 加快其收敛速度。

### 3 仿真分析

#### 3.1 遗传算法控制变形镜补偿光学系统像差的原理介绍

在无波前探测器自适应光学系统中, 不用波前相位传感器测量波前相位信息, 而常常是在光学系统的远场焦斑位置设置一小孔光阑, 在光阑后再放置一台光电探测器, 例如 CCD 相机, 用来测量光束的远场焦斑小孔光阑后的光强信号。该光强信号既作为自适应光学系统闭环控制的反馈信号又作为要优化的目标函数。利用遗传算法控制 19 单元变形镜校正静态光束像差的研究工作<sup>[7]</sup>, 其主要思想为: 遗传算法首先随机产生包含一定数量个体的初始种群, 此处个体称之为父个体。每个个体分别对应变形镜的一个面形, 每个面形分别由 19 个电压值决定, 在自适应光学系统中, 在每一个面形作用下又会产生一个相应的远场焦斑光强信号, 把小孔后 CCD 相机探测到的光强信号作为遗传算法的适应度函

数。按照轮盘赌的概率原则, 根据适应度函数值的大小, 选取与父个体相同数量的子个体, 然后让这些子个体之间按一定的交叉概率  $P_c$  进行单点交叉操作。交叉操作后, 再按一定的变异率  $P_m$  让一些个体自身发生变异(也即面型个体对应的 19 个电压值中的某一个发生改变)。这样可以给种群中引入新的个体, 有效避免算法过早收敛而陷入局部最优值。经历以上选择、交叉、变异后形成的各个个体组成的种群, 就称为新一代。遗传算法按照以上步骤, 依次迭代运行, 直到满足终止条件。

对固体激光器像差特性研究表明, 在固体激光器中, 最主要的像差集中在前 10 阶<sup>[8]</sup>, 而且在很多光学系统中, 最主要的像差也大都集中在 10 阶以下的低阶像差(如倾斜、离焦、彗差、像散等)。因此, 能够利用前 10 阶泽尼克多项式表征光学系统的像差, 并通过优化施加在各个驱动器背后的泽尼克多项式系数, 达到校正光学像差的目的。

#### 3.2 仿真过程

为了检验变形镜 19 个驱动器电压和前 10 阶泽尼克多项式模式系数之间的关系矩阵  $\mathbf{U}$  的有效性, 先利用前 10 阶泽尼克多项式产生一个带像差的波前(像差大小不超过变形镜的行程量), 再根据求得的关系矩阵得出变形镜驱动器电压, 控制变形镜重构出一个波前, 然后观测两个波前的相似性以及两个波前相减得到的残余波前的情况。图 2(a), (b), (c)分别对应前 10 阶泽尼克多项式产生的波前、变形镜重构的波前和残余波前, 其中横坐标表示仿真所取的网格靶面大小( $100 \times 100$ , 无量纲)。由图 2 可知, 两个波前的相似性很好, 残余波前的峰谷值(PV)和均方根(RMS)都比较小, 这说明关系矩阵能够有效地表征变形镜电压和前 10 阶泽尼克多项式的转化关系。

仿真中要校正的光束波前是在实验中采集的一幅 YAG 固体激光器输出的 1064 nm 激光波前<sup>[6]</sup>, 远场光斑通过快速傅里叶变换算法得到。遗传算法的初始种群包含 20 个个体, 每个个体分别对应于一组(10 个)泽尼克模式系数, 由程序随机产生。运算次数设为 200 次。交叉率  $P_c$  设为 0.9, 变异率  $P_m$  设为 0.4。在仿真程序中, 通过软件把小孔光阑的口径设置为和入射波前的远场艾里斑一样大。仿真系统取归一化的  $100 \times 100$  的网格点。变形镜驱动器影响函数为<sup>[9~11]</sup>

$$f(r) = \exp[\ln(C_m)(|r|/r_0)^a], \quad (10)$$

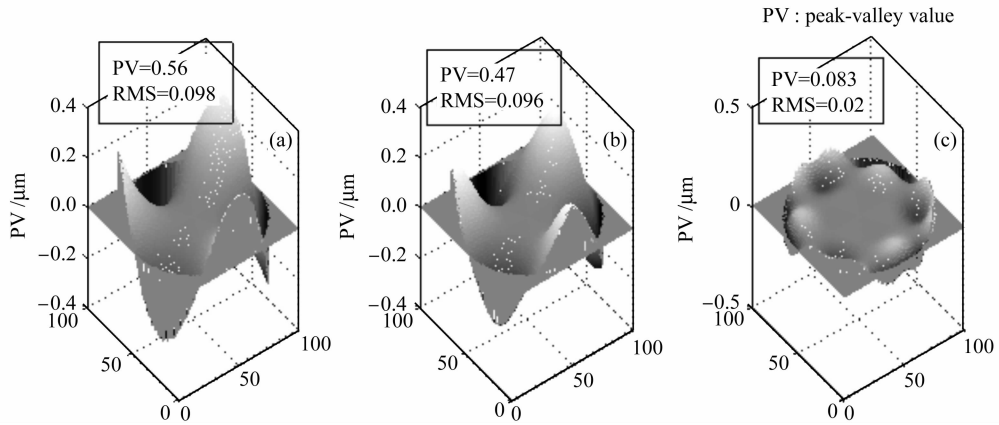


图 2 (a) 前 10 阶泽尼克多项式产生的波前;(b) 变形镜根据关系矩阵重构的波前;(c) 二者对应位置相减得到的残余波前  
 Fig. 2 (a) Wave-front generated by the first-10 order Zernike polynomial; (b) wave-front restructured by DM; (c) residual wave-front

式中  $r_0$  为驱动器间距,取  $a = 2, C_m = 0.25$ 。把通过小孔光阑后的光强强度之和作为遗传算法的适应度函数,光强强度越大就认为波前像差补偿得越彻底,焦斑的能量就会越集中。

为了对比优化模式系数和优化驱动器电压值的遗传算法的性能,我们也作了优化变形镜驱动器电压的仿真分析,遗传算法初始种群的个体数也设为 20,其他遗传操作与优化模式系数的情况相同,不同的是现在种群中各个体分别对应的是一组 (19 个) 电压值。

图 3 是优化变形镜驱动器后 19 个电压和优化前 10 阶泽尼克模式系数的遗传算法控制变形镜校正同一束波前得到的平均适应度曲线。图 3 纵坐标经过归一化处理,1.0 代表的是远场光斑达到了衍射极限。由图 3 可以看出,本文提出的优化泽尼克模式系数的遗传算法较之直接优化电压值的遗传算法在控制变形镜时有明显的优势。经过 200 次迭代运行,前者基本收敛,适应度值达到 0.95,而后者远未达到收敛,适应度值约为 0.5;从校正性能看,前者只需要 20 次就能达到后者 200 次才能达到的适应

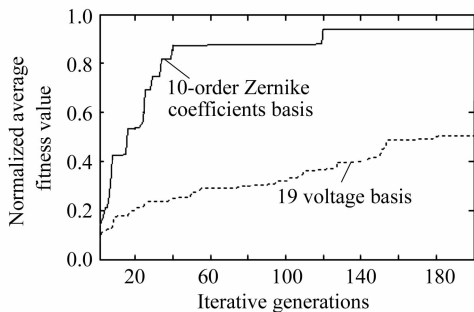


图 3 遗传算法的平均适应度曲线

Fig. 3 Average fitness value based on two different basis

度值。

图 4(a) 是基于优化电压的遗传算法控制变形镜校正固体激光器光束像差的近场波面情况。其中

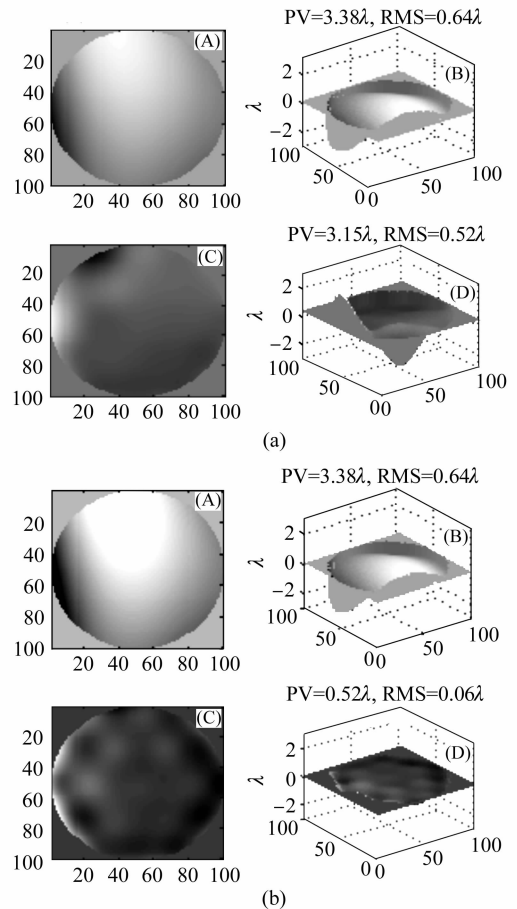


图 4 基于优化电压(a)和优化泽尼克模式系数(b)的遗传算法控制变形镜的近场波面校正效果

Fig. 4 Near-field distribution before and after correction based on optimal voltages (a) and optimal Zernike mode coefficients (b)

(A),(B)分别是像差校正前光束近场波面的二维和三维图,而(C),(D)分别是像差校正后光束近场波面的二维和三维图。由图 4(a)可知,光束波面峰谷值和均方根值分别由校正像差前的  $3.38\lambda$  ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ )和  $0.64\lambda$  降低为  $3.15\lambda$  和  $0.52\lambda$ ,改善效果并不十分理想。图 4(b)是基于优化前 10 阶泽尼克模式系数的遗传算法控制变形镜校正同一束激光光束像差的近场波面情况。其中(A),(B)分别是像差校正前的近场波面的二维和三维图,而(C),(D)分别是像差校正后的近场波面的二维和三维图,由图 4(b)可知,光束波面峰谷值和均方根值分别由校正像差前的  $3.38\lambda$  ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ )和  $0.64\lambda$  降低为  $0.52\lambda$  和  $0.06\lambda$ ,改善效果十分显著。

图 5(a)是基于优化电压的遗传算法控制变形镜校正固体激光器光束像差的远场焦斑情况。其中(A),(B)分别是像差校正前光束远场焦斑分布的二维和三维图,而(C),(D)分别是像差校正后光束远场焦斑分布的二维和三维图,由图 5(a)可知,在像

差校正前后远场焦斑由分散变得聚集,其峰值斯特尔(Strehl)比由校正前的 0.06 上升到 0.5。图 5(b)是基于优化前 10 阶泽尼克模式系数的遗传算法控制变形镜校正同一束激光光束像差的远场焦斑情况。其中(A),(B)分别是像差校正前的光束远场焦斑分布的二维和三维图,而(C),(D)分别是像差校正后的光束远场焦斑分布的二维和三维图,由图 5(b)可知,较之图 5(a),在像差校正前后远场焦斑由分散变得更加聚集,其远场光斑已经接近于理想的艾里斑,其峰值斯特尔比更是由校正前的 0.06 上升到 0.95。

### 4 结 论

描述了基于遗传算法的优化泽尼克模式系数的自适应光学系统的基本原理,推导出 19 单元变形镜电压值与前 10 阶泽尼克多项式模式之间的关系矩阵。仿真研究了以前 10 阶泽尼克模式系数为遗传算法的优化函数和直接以 19 个变形镜电压值为优化函数的对比性能。仿真结果表明,同直接优化电压的方法相比,利用遗传算法优化前 10 阶泽尼克模式系数的方法能够更快地达到收敛,收敛速度提高了 5 倍以上,并且后者不论对光束波面近场还是焦斑远场的校正效果都更加优越。值得说明的是,本文中优化的泽尼克模式系数仅为前 10 阶,这是因为一方面受到 19 单元变形镜的校正能力限制,另一方面前 10 阶已经能满足大多数系统的需求,但这并不意味着该方法只局限于前 10 阶的情况,如果变形镜的单元数增大,待校正系统的像差类型超过 10 阶泽尼克多项式可以表达的范围,那么增大泽尼克模式的基底也是很方便的,即仅仅需要按本文的方法,重新求取一个关系矩阵即可。还值得指出的是,如果事先对光学系统中包含的像差有了一定的先验知识,那么可以针对系统中的具体像差类型,初始化个体时将其他阶系数置零,只优化与这些像差对应的泽尼克系数,这样算法速度将进一步得到提高。

### 参 考 文 献

- 1 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10):1236~1240  
李新阳,姜文汉. 哈特曼-夏克波前传感器的泽尼克模式复原误差[J]. *光学学报*, 2002, **22**(10):1236~1240
- 2 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubing. Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system [J]. *Chinese J. Lasers*, 1988, **15**(1):17~21  
姜文汉,黄树辅,吴斌旭. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. *中国激光*, 1988, **15**(1):17~21

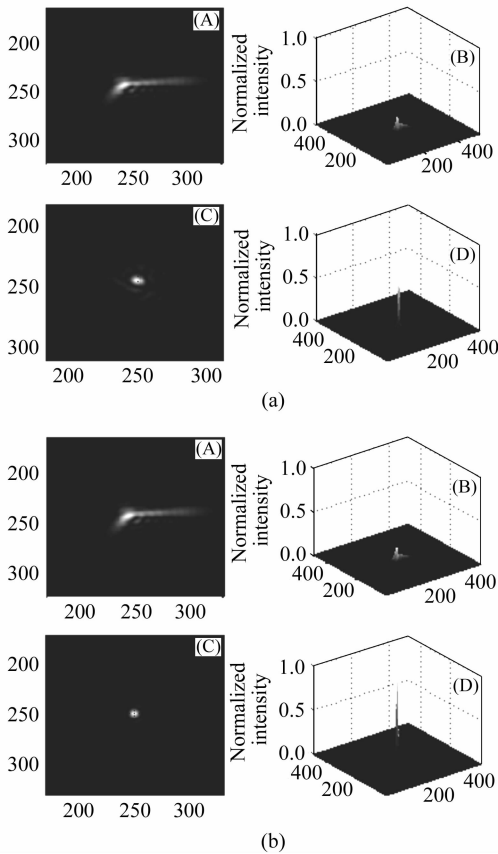


图 5 基于优化电压(a)和优化泽尼克模式系数(b)的遗传算法控制变形镜的远场焦斑校正效果

Fig. 5 Far-field distribution before and after correction based on optimal voltages (a) and optimal Zernike mode coefficients (b)

3 Wenhan Jiang, Huagui Li. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm [C]. *SPIE*, 1990, **1271**:82~93

4 O. Albert, L. Sherman, G. Mourou *et al.*. Smart microscope: an adaptive optics learning system for aberration correction in multiphoton confocal microscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):52~54

5 A. C. F. Gonte, R. Dandliker. Optimization of single-mode fiber coupling efficiency with an adaptive membrane mirror [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(5):1073~1076

6 P. N. Marsh, D. Burns, J. M. Girikn. Practical implementation of adaptive optics in multiphoton microscopy [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(10):1123~1130

7 Ping Yang, Shijie Hu, Xiaodong Yang *et al.*. Test and analysis of the time and space characteristics of phase aberration in a diode-side-pumped Nd:YAG laser [C]. *SPIE*, 2005, **6108**:60180M

8 P. Yang, S. J. Hu, S. Q. Chen *et al.*. Research on the phase aberration correction with a deformable mirror controlled by a genetic algorithm [C]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, **48**:1017~1024

9 Yang Ping, Xu Bing, Jiang Wenhan *et al.*. Study of a genetic algorithm used in an adaptive optical 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

10 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1355~1360  
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1355~1360

11 Shao Li, Xian Hao. Influence of deformable mirror parameter variation on aberration correction for atmospheric turbulence [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(5):7~10  
邵力, 鲜浩. 变形镜参数变化对湍流像差校正效果的影响[J]. *光电工程*, 2004, **31**(5):7~10



## *Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)“纳米光学”专题 征 稿 启 事

纳米科学与技术的快速发展对许多学科产生了巨大影响,尤其是激光与光学领域。*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于2008年10月推出“纳米光学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“纳米光学”方面原创性的研究论文,旨在集中报道该方面最新的研究成果及研究进展,以引起国内外广大科研工作者的更大关注。

征稿范围包括:

- Quantum dots and nanowires
- Photonic crystals
- Silicon photonics
- Solar cells and solar energy
- VCSELs
- Slow light and fast light
- Plasmonics
- Other

**Feature Editors:**

Connie Chang-Hasnain  
John R. Whinnery Chair Professor in  
Electrical Engineering and Computer  
Sciences  
University of California

T. P. Lee  
Telcordia Technologies (Retired)

截稿日期:2008年5月15日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“纳米光学专题投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shcnc.ac.cn 询问。