

# 基于滤波函数的分立变形镜波前校正效果预估

马雪梅 韩开 张彬

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要** 采用变形镜影响函数对畸变波前的校正过程进行模拟, 并利用超高斯滤波函数对模拟的校正效果进行拟合和统计, 确定出变形镜交连值与滤波函数平滑因子的定量关系, 进而建立和完善了基于滤波函数的分立变形镜波前校正预估模型。在此基础上, 针对具有随机畸变波前的环状光束, 对波前校正预估模型的有效性和适应性进行了验证和分析。在实际工作中, 只要给定分立变形镜的驱动器间距和变形镜交连值, 即可利用给出的超高斯滤波函数波前校正预估模型, 从而简便而准确地预估变形镜对不同畸变波前的校正效果。

**关键词** 大气光学; 分立变形镜; 校正效果; 交连值; 平滑因子; 滤波函数

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0101002

## Prediction for Wavefront Correction Effect of Discrete Deformable Mirror Based on Filter Function

Ma Xuemei Han Kai Zhang Bin

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** The correction about distorted wavefront of discrete deformable mirror is simulated by using the influence function, and the simulated correction result is fitted by super-Gaussian filter function. Consequently, a quantitative relationship between the crosslinking value of deformable mirror and the smooth factor of super-Gaussian filter function is determined, and a prediction model for correction effect on distorted wavefront of discrete deformable mirror based on filter function is established and improved. The validity and adaptability of the prediction model are verified and analysed for annular beams with distorted wavefront. In practical applications, the prediction model can be used to predict the correction effect of deformable mirror for laser beams with different wavefronts conveniently and accurately as long as the driver spacing and crosslinking values of the discrete deformable mirror are given.

**Key words** atmospheric optics; discrete deformable mirror; correction effect; coupling value; smooth factor; filter function

**OCIS codes** 010.1080; 010.3310; 230.4040

## 1 引 言

连续表面分立驱动压电变形镜(简称分立变形镜)是我国自主研发的波前相差校正装置,也是目前国内比较常用的自适应光学系统的关键器件。分立变形镜具有波前拟合误差小、光能利用率高、空间分辨率高、能保持相位连续和易于抛光镀膜等优点<sup>[1]</sup>,已成功用于“神光”系列激光核聚变装置的光束整形<sup>[2-3]</sup>、中国科学院云南天文台高分辨率望远镜成

像<sup>[4]</sup>以及轻型人眼视网膜高分辨率成像系统等应用领域<sup>[5]</sup>。然而,分立变形镜的表面面形连续性也决定了交连效应是其应用中必须考虑的因素,交连效应的存在会对变形镜的校正效果造成明显影响。

Harvey 等<sup>[6]</sup>曾指出变形镜对畸变波前的校正作用相当于一个高通滤波过程,变形镜能够对低于特定空间频率的畸变波前予以校正,而对高于该空间频率的畸变波前则起不到校正作用。因此,可方

**收稿日期:** 2013-06-21; **收到修改稿日期:** 2013-08-23

**基金项目:** 中国科学院自适应光学重点实验室基金项目(LAOF201303)

**作者简介:** 马雪梅(1988—),女,硕士研究生,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: 993850886@qq.com

**导师简介:** 张彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。E-mail: zhangbinff@sohu.com

便地利用滤波函数对变形镜校正效果进行预估<sup>[1]</sup>。超高斯滤波函数是与变形镜实际作用效果比较接近的一种滤波函数<sup>[7-8]</sup>，其中的参数截止频率已被证明是2倍变形镜驱动器间距的倒数，而平滑因子则是与变形镜交连值相关的参数<sup>[9]</sup>，但具体该如何确定文献中并没有给出。由于平滑因子选取不同，采用超高斯滤波函数预估变形镜的校正效果不同。因此，在利用滤波方法对变形镜的校正效果进行预估时，必须准确地选取平滑因子，才能获得符合实际校正过程的预估结果。为此，本文将采用影响函数来模拟分立变形镜对畸变波前的校正，并利用超高斯滤波函数对模拟的变形镜校正效果进行拟合，以确立变形镜交连值与滤波函数中平滑因子的定量关系，进而建立一个能够更为准确地预估变形镜校正效果的滤波函数模型。在此基础上，对建立的预估模型的有效性和适应性进行验证。

## 2 分立变形镜波前校正效果预估模型

### 2.1 滤波函数模型

变形镜对畸变波前的校正作用相当于一个高通滤波过程<sup>[10]</sup>，变形镜能对低于特定空间频率的畸变波前给以校正，而对高于该空间频率限制的畸变波前则起不到校正作用。假定畸变波前 $\phi_u(x, y)$ 经变形镜校正后的残余波前为 $R(x, y)$ ，则变形镜的滤波函数 $H$ 可表示为

$$H = \frac{\mathcal{F}(R)}{\mathcal{F}(\phi_u)} = 1 - \frac{\mathcal{F}(M)}{\mathcal{F}(\phi_u)}, \quad (1)$$

式中 $\mathcal{F}$ 表示对波前作傅里叶变换， $M = \phi_u - R$ ，为变形镜构造波前。

在比较理想的情况下，变形镜对于具有不同空间频率 $\rho$ 的畸变波前的作用效果可简化为一个阶梯形滤波函数<sup>[6]</sup>，变形镜对畸变波前能够校正的最大空间频率（即截止频率）与变形镜的驱动器间距 $d$ 有关，为 $1/(2d)$ <sup>[7]</sup>。于是，简化的滤波函数可表示为

$$H = \begin{cases} 0, & \rho < 1/(2d) \\ 1, & \rho \geq 1/(2d) \end{cases}. \quad (2)$$

然而，由于受变形镜自身约束条件的限制，变形镜的实际滤波效果更接近于超高斯形滤波函数<sup>[7]</sup>，即

$$H(\rho) = 1 - \exp[-0.693(\rho/\rho_0)^p], \quad (3)$$

式中 $\rho_0 = 1/(2d)$ ，为变形镜截止频率； $p$ 称为平滑因子，是决定超高斯滤波函数上升沿陡峭程度的超高斯指数，与变形镜交连值相关<sup>[9]</sup>。

与阶梯形滤波函数相比，超高斯形滤波函数在截止频率附近呈现逐渐变化趋势。当 $\rho$ 等于截止频率 $\rho_0$ 时， $H = 1 - \exp(-0.693) = 0.5$ 。平滑因子 $p$ 在滤波函数中充当超高斯指数，主要影响滤波函数上升沿陡峭程度（如图1所示）， $p$ 越大，变形镜对高频畸变波前的校正效果越差，而对低频畸变波前的校正效果则越好。

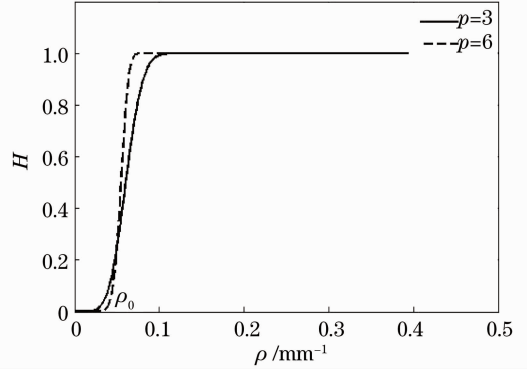


图1 不同平滑因子对应的滤波函数曲线  
Fig. 1 Filter function curves with different smooth factors

### 2.2 影响函数模型

当分立变形镜的一个驱动器单独作用时，由于相邻驱动器间的弹性力约束作用，整个变形镜的面形均会产生扰动。通常可以用影响函数来表示变形镜一个驱动器单独作用时所引起的整个变形镜面形<sup>[11]</sup>，其归一化形式为

$$I_i(x, y) = \exp\left[\ln b \cdot \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{d^2}\right], \quad (4)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n,$

式中 $d$ 为驱动器间距； $b$ 为交连值，与镜面刚度、驱动器刚度及驱动器配置形状有关<sup>[12]</sup>； $(x_i, y_i)$ 为驱动器 $i$ 的位置坐标。

由(4)式可以看出，变形镜交连值越大，镜面间的相互牵扯越大，镜面面形越平缓。因此，交连值的增大，将有助于变形镜对于低空间频率波前的校正，而抑制变形镜对高空间频率波前的校正<sup>[8]</sup>。这与超高斯形滤波函数中平滑因子的作用类似，只不过交连值对应空间域，而平滑因子对应空间频率域。因此，本文将通过模拟变形镜的校正过程，计算拟合变形镜的滤波效果，从而探寻交连值与平滑因子之间的定量关系。

当分立变形镜各个驱动器均独立驱动时，多个驱动器同时作用时的变形镜面形构造波前 $M(x, y)$ 则是各个驱动器独立作用时镜面面形的线性叠加<sup>[7]</sup>，即

$$M(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y), \quad (5)$$

式中  $V_i$  为第  $i$  个驱动器的等效控制电压。

变形镜对待校正波前为  $\phi_u(x, y)$  的目标驱动电压控制方程为

$$\phi_u(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y). \quad (6)$$

通常情况下, (6) 式中的  $V_i$  难以获得解析解, 而只能在误差允许范围内寻找最优解, 从而使变形镜构造波前  $M(x, y)$  最大程度地接近待校正波前  $\phi_u(x, y)$ 。于是, 校正后的残余波前为

$$R(x, y) = \phi_u(x, y) - \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y). \quad (7)$$

可利用最小二乘法将  $M(x, y)$  与待校正波前  $\phi_u(x, y)$  进行拟合<sup>[12]</sup>, 以使拟合方差  $\sigma^2$  取极小, 从而可导出线性方程组:

$$\sum_{j=1}^n V_j \iint I_i(x, y) \cdot I_j(x, y) dx dy = \iint \phi_u(x, y) \cdot I_i(x, y) dx dy. \quad (8)$$

进一步令  $\iint I_i(x, y) \cdot I_j(x, y) dx dy = I_{ij}$ ,

$\iint \phi_u(x, y) \cdot I_i(x, y) dx dy = S_i$ , (8) 式即为

$$\mathbf{IV} = \mathbf{S}, \quad (9)$$

式中,

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \cdots & I_{nm} \end{bmatrix}, \mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}.$$

由(9)式可以很方便地求出变形镜的控制电压矩阵  $\mathbf{V}$ , 进而可获得分立变形镜对畸变波前的校正效果。本文正是利用这个方法模拟变形镜对于畸变波前的校正效果的。

以上控制算法仅针对理想化的变形镜模型, 而在实际的变形镜应用中, 考虑到一些变形镜自身可能存在的问题, 如压电陶瓷驱动器所存在的变形与电压迟滞以及变形镜的初始面形误差等, 应对上述控制算法进一步完善。

对于压电陶瓷驱动器的迟滞效应<sup>[13]</sup>, 可以将测试获得的变形镜的变形量与电压特性曲线输入变形镜的波前控制系统, 进而波前处理系统在产生控制电压信号时即可预见特定电压信号所产生的变形镜

面形。由此, 压电陶瓷驱动器的变形与电压迟滞对校正效果所造成的影响可以通过波前控制系统有效解决, 本文将不再考虑。

考虑到变形镜的热稳定性以及动态稳定性<sup>[14]</sup>, 镜面的初始面形误差也是变形镜在进行波前校正时需要考虑的因素。由变形镜初始面形误差  $\phi_m(x, y)$  所造成的影响, 可以利用自适应校正系统的负反馈机制<sup>[15]</sup> 将其与待校正的畸变波前  $\phi_u(x, y)$  一起考虑, 在进行控制电压计算时, 将(6)~(8)式中的  $\phi_u(x, y)$  改为  $\phi_u(x, y) - \phi_m(x, y)$  即可。

### 3 变形镜交连值与平滑因子的定量关系

为寻求变形镜交连值与滤波函数中平滑因子的关系, 计算过程分为两个步骤: 1) 模拟变形镜的校正作用, 对于随机畸变波前  $\phi_u(x, y)$ , 给定变形镜的交连值  $b$ , 根据(9)式计算分立变形镜控制电压矩阵, 进而再利用(1)式计算模拟校正的相应滤波效果; 2) 滤波效果的拟合, 利用(3)式给出的超高斯形滤波函数对步骤 1) 得到的滤波效果进行拟合, 并通过改变平滑因子  $p$ , 找出最佳拟合滤波函数对应的平滑因子, 即与给定交连值  $b$  所对应的平滑因子  $p$ 。进一步以交连值  $b$  作为自变量, 平滑因子  $p$  作为因变量, 重复上述步骤, 可以得到一系列交连值与平滑因子的关系。考虑到分立变形镜交连值一般在 0.05 ~ 0.2 之间<sup>[16]</sup>, 计算中交连值  $b$  的变化范围取为 0.05 ~ 0.2, 驱动器间距取  $d=10$  mm, 计算中, 利用参考文献[17]中给出的方法构建随机畸变波前, 其峰谷(PV)值控制在分立变形镜的最大位移量  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ <sup>[18]</sup> 以内。

图 2(a) 为交连值  $b=0.2$  时, 对一个畸变波前的校正模拟, 图中实线为待校正的畸变波前, 虚划线为模拟的变形镜构造波前, 虚点线为由最佳拟合滤波函数反推得到的变形镜构造波前。图 2(b) 为图 2(a) 的对应滤波效果拟合, 图中实线为模拟计算的变形镜滤波效果曲线, 虚划线为最佳拟合的超高斯滤波函数曲线, 对应平滑因子  $p=7.6248$ 。

从图 2(a) 可以看出, 由最佳拟合滤波函数反推的变形镜校正效果与计算模拟的变形镜校正效果非常接近, 即拟合得到的滤波函数能很好地反映变形镜的校正效果。

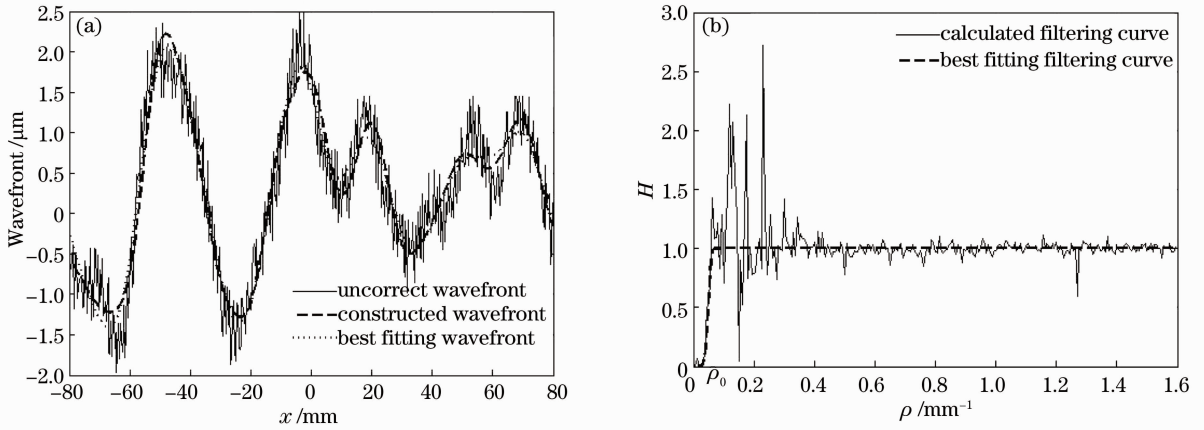


图 2  $b=0.2$  时对随机波前的(a)校正模拟和(b)滤波效果拟合

Fig. 2 (a) Correction simulation and (b) filtering effect fitting of random wavefronts when  $b=0.2$

为了更接近实际,还计算了变形镜在具有初始面形误差时的波前校正效果,考虑到由压电变形镜热稳定性造成的面形变化主要包括离焦、像散、彗差和球差等低阶像差<sup>[19]</sup>,本文所构建变形镜初始面形误差主要包括上述畸变项,图 3 给出了构建的变形镜初始面形误差,PV 值为  $1.5 \mu\text{m}$ 。将该初始面形误差考虑在内,仍然对图 2 中畸变波前进行校正,图 4(a)、(b)分别为对上述畸变波前的校正效果模拟及滤波效果拟合,图 4(a)中虚划线所对应的变形镜构造波前为变形镜初始面形与驱动面形作用效果之和,图 4(b)中对应交连值  $b=0.2$  的最佳拟合平滑因子  $p=7.6343$ ,与前面没有初始面形误差时的拟合效果非常接近。

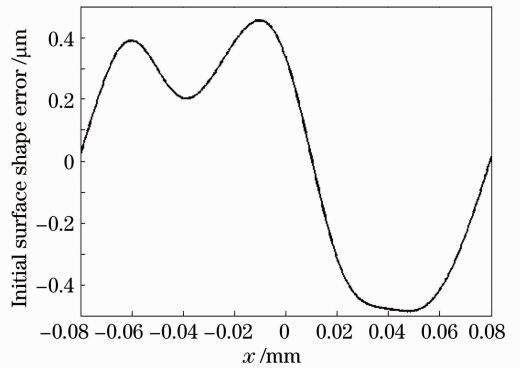


图 3 变形镜的初始面形误差

Fig. 3 Initial surface shape error of the deformable mirror

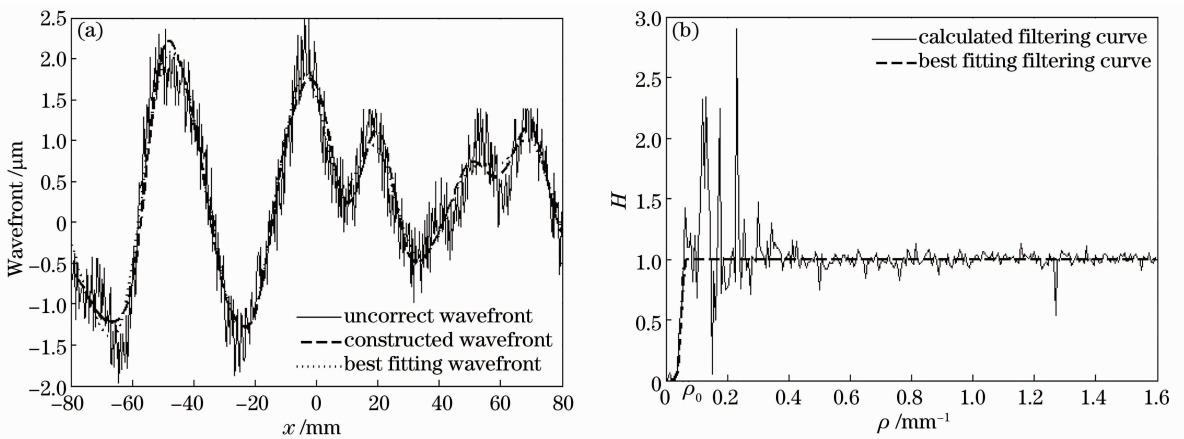


图 4 存在初始面形误差的变形镜对随机波前的(a)校正模拟和(b)滤波效果拟合

Fig. 4 (a) Correction simulation and (b) filtering effect fitting of random wavefronts when a shape error exits on the surface of deformable mirror

将变形镜交连值作为自变量,计算不同交连值对应的平滑因子发现:对于每一畸变波前,其对应的交连值与平滑因子之间基本遵循线性变化关系,平

滑因子几乎随着交连值线性增加。然而,不同畸变波前的交连值与平滑因子对应关系会略有差别,即给定一个交连值,对于不同的畸变波前,与其滤波效

果最佳拟合的滤波函数的平滑因子并非一个完全固定的值,而是在一个小范围内变化。这是由于不同畸变波前包含的各频率成分是随机分布的。进一步从图 2(b)可以看出,变形镜的实际滤波效果曲线是一条振荡的曲线,因而难以确保不同畸变波前的滤波效果拟合完全一致。

为了在实际工作中为变形镜滤波效果预估提供相对准确的参数,对不同畸变波前对应的交连值与平滑因子关系进行统计。对于每一个给定的交连值  $b$ ,模拟变形镜对  $n$  个不同畸变波前的校正效果并拟合其滤波函数,对应各畸变波前所得最佳拟合平滑

因子为  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , 相应的拟合误差为  $e_1, e_2, \dots, e_n$ 。将这些拟合误差的倒数作为权值,对不同畸变波前求得的平滑因子进行加权求平均,即可得到平滑因子的统计平均值  $\bar{p}$ ,并计算出统计中的标准差  $\Delta p$  来表示平滑因子偏离统计平均值的离散程度。

表 1 列出了对 80 组畸变波前的交连值与平滑因子关系的统计结果。从表 1 可以看出,经统计的畸变波前  $b-\bar{p}$  也几乎呈线性关系,进一步采用二项式拟合法得到相应的线性关系为  $\bar{p}=21.9720 \cdot b+3.4662$ ,拟合结果如图 5 所示。

表 1 随机波前交连值与平滑因子关系统计结果

Table 1 Statistic results of crosslinking values versus smooth factor relation for random wavefronts

$b$	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19
$\bar{p}$	4.3896	4.9837	5.5071	5.9657	6.3893	6.7976	7.1917	7.5703
$\Delta p$	0.4391	0.5530	0.6873	0.8098	0.9105	1.0104	1.1261	1.2489

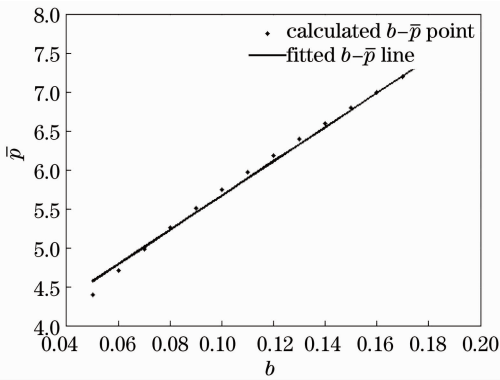


图 5 交连值与平滑因子线性关系拟合结果

Fig. 5 Linear fitting of statistic coupling values versus smooth factor relation

将上述  $b-\bar{p}$  线性关系代入(3)式,截止频率  $\rho_0$  用  $1/(2d)$  替换,就可以得到一个具有确切工程意义的滤波函数:

$$H(\rho) = 1 - \exp[-0.693 \times (2d\rho)^{21.9720 \cdot b + 3.4662}], \quad (10)$$

式中驱动器间距  $d$  和交连值  $b$  均为变形镜自身工程参数,可以通过工程测得<sup>[16]</sup>。利用滤波函数(10)式可更方便准确地预估变形镜对于畸变波前的校正效果,即本文得到的变形镜波前校正效果的预估模型。

#### 4 基于滤波函数的预估效果验证

为了验证上述滤波函数预估模型(10)式的有效性,以具有畸变波前的环状光束为例,通过两种手段模拟变形镜对其波前的校正作用,比较两种方式下环状光束的远场聚焦光斑特性。其中,1)利用影响

函数直接模拟变形镜的实际校正过程,通过计算控制电压矩阵,获得波前校正效果;2)利用滤波函数(10)式模拟变形镜对波前的校正效果。为了方便起见,模拟过程中分立变形镜的驱动器布局采用 45 单元方形子孔径排布,驱动器间距  $d=10$  mm。同时,在校正过程中,还考虑了变形镜存在初始面形误差,如图 6 所示。

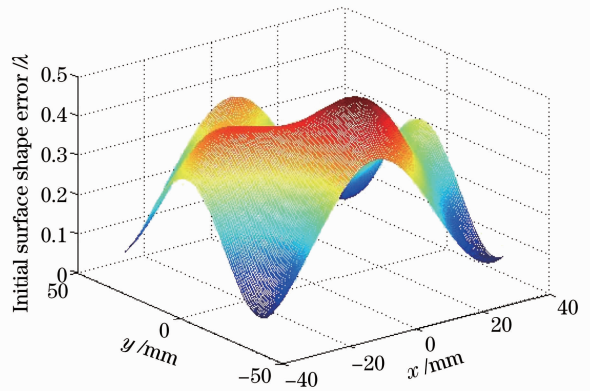


图 6 变形镜的初始面形误差

Fig. 6 Initial surface shape error of the deformable mirror

图 7 给出了初始环状光束的光强分布和畸变波前分布。图 8 为利用影响函数模拟的变形镜构造波前以及由滤波函数(10)式模拟的变形镜构造波前,交连值  $b=0.2$ 。环状光束经波前校正后的对应远场光强分布如图 9 所示。图 9(a)给出了波前未经校正的光束远场光强分布;图 9(b)给出了利用影响函数模拟变形镜波前校正的光束远场光强分布;图 9(c)给出了采用滤波函数(10)式模拟波前校正



的光束远场光强分布。从图 8 和图 9 可以看出,两种方式模拟的变形镜波前校正效果非常接近,且波前校正后的光束远场光强分布也非常相似。进一步计算远场光斑的衍射极限倍数  $\beta$  值,图 9(a) 对应光束远场光斑  $\beta_0 = 9.10$ ,图 9(b) 对应光束远场光斑

$\beta_1 = 2.22$ ,图 9(c) 对应光束远场光斑  $\beta_2 = 2.10$ ,两种方式模拟的波前校正下的远场光斑  $\beta$  值非常接近。由此可见,由滤波函数模拟的波前校正效果与影响函数模拟的变形镜波前校正效果非常接近。

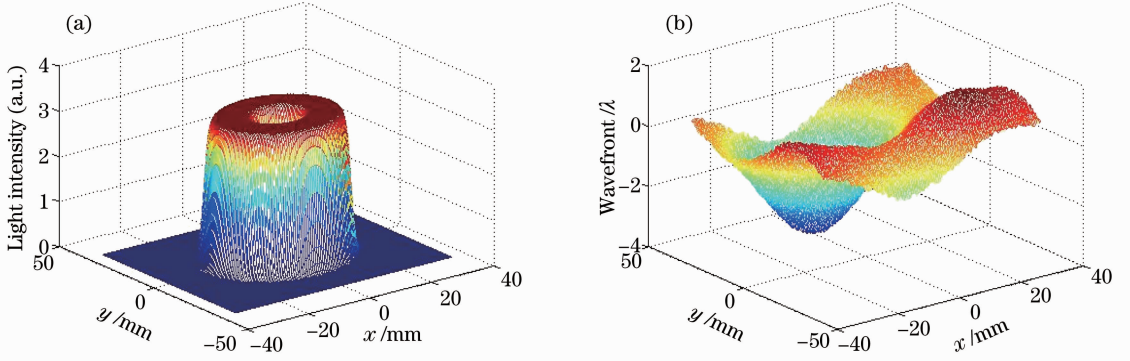


图 7 初始环状光束的(a)光强分布和(b)波前分布

Fig. 7 Distributions of (a) intensity and (b) wavefront of initial annular beam

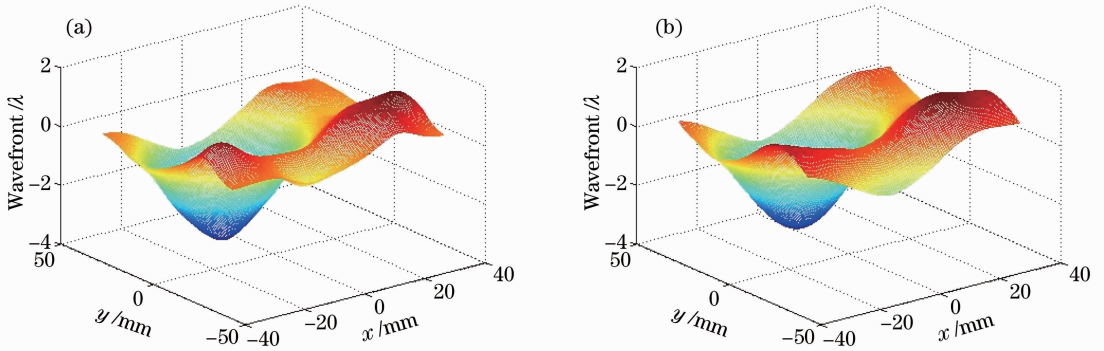


图 8 利用(a)影响函数和(b)滤波函数模拟的变形镜构造波前

Fig. 8 Deformable mirror wavefronts constructed by (a) influence function and (b) filter function

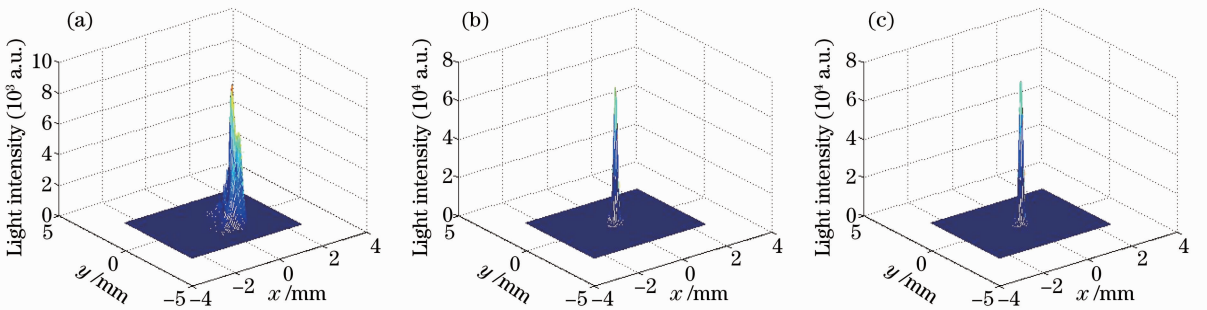


图 9 不同波前校正情况下的远场光强分布。(a)未经校正;(b)影响函数模拟校正;(c)滤波函数模拟校正

Fig. 9 Far-field intensity distributions of laser beams with different wavefront corrections. (a) Uncorrected;

(b) corrected by influence function; (c) corrected by filter function

为了进一步验证上述滤波函数预估模型的适应性,采用该滤波函数模型模拟了上述变形镜对多组畸变波前的校正效果,发现由滤波函数模拟的波前校正效果与影响函数模拟的波前校正效果非常接

近,表 2 列举了几组典型的计算结果,表中  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  分别对应波前未经校正的光束远场光斑  $\beta$  值,以及波前经影响函数模拟校正和滤波函数模拟校正的光束远场光斑  $\beta$  值。

表 2 对多组畸变波前的校正效果对比

Table 2 Comparison of correction effects of several aberrant random wavefronts

$\beta$	Value				
$\beta_0$	9.94	12.81	13.31	11.12	8.55
$\beta_1$	2.12	2.36	2.29	2.29	2.22
$\beta_2$	2.02	2.10	2.02	2.12	2.16

从表 2 可以看出,针对不同的待校正畸变波前,波前经影响函数模拟校正后的远场光斑  $\beta$  值与波前经滤波函数模拟校正后的远场光斑  $\beta$  值基本一致,从而进一步证实了上述滤波函数可以很好地反映变形镜对畸变波前的校正效果,可作为变形镜校正效果的预估模型。

## 5 结 论

利用影响函数模拟分立变形镜对畸变波前的校正,并计算拟合变形镜的滤波效果,采用统计方法获得了变形镜交连值与滤波函数平滑因子的线性定量关系,即:  $p = 21.9720b + 3.4662$ ,完善了基于滤波函数的变形镜校正效果的预估模型:  $H(\rho) = 1 - \exp[-0.693 \times (2d\rho)^{21.9720b+3.4662}]$ 。为了验证该预估模型的有效性和适应性,利用该滤波函数模拟了变形镜对于具有任意畸变波前的环状光束的校正,并与用影响函数模拟的变形镜校正效果进行了对比,发现由滤波函数模拟的变形镜波前校正效果与用影响函数模拟的变形镜校正效果基本一致。由此可见,在实际工作中,可方便地利用本文给出的滤波函数简便而准确地预估变形镜对于畸变波前的校正效果。值得指出的是,本文仅对变形镜的静态校正过程进行了模拟,鉴于目前自适应系统的工作带宽最大可达到几百赫兹甚至上千赫兹,一般可以较好地满足其主要校正对象——大气湍流的实时性工作要求(大气湍流的时间特征长度  $\tau_0$  为毫秒量级),因而本文建立的波前校正效果的预估模型同样也可用于变形镜的动态校正效果预估。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Huafeng. Study of Wavefront Correction Technique Based on Combinational-Deformable-Mirror for Improving Spatial Compensation Capability of the Adaptive Optics System [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.  
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.
- 2 Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin, *et al.*. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1625-1634.  
姜文汉, 杨泽平, 官春林, 等. 自适应光学技术在惯性约束核聚变领域应用的新进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1625-1634.

- 3 Wang Deen, Hu Dongxia, Dai Wanjun, *et al.*. Far field irradiance profile control in inertial confinement fusion drive facility with adaptive optics [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0312002.  
王德恩, 胡东霞, 代万俊, 等. 惯性约束聚变驱动装置中焦斑整形的自适应光学方法[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0312002.
- 4 Rao Changhui, Zhu Lei, Rao Xuejun, *et al.*. 37-element solar adaptive optics for 26-cm solar fine structure telescope at Yunnan astronomical observatory [J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(10): 966-968.
- 5 Zhou Hong, Guan Chunlin, Dai Yun. Bimorph deformable mirrors for adaptive optics of human retinal imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0211001.  
周虹, 官春林, 戴云. 用于自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0211001.
- 6 J E Harvey, G M Callahan. Wavefront error compensation capabilities of multi-actuator deformable mirrors [C]. SPIE, 1978, 141: 50-57.
- 7 R K Tyson, D M Byrne. The effect of wavefront sensor characteristics and spatiotemporal coupling on the correcting capability of a deformable mirror [C]. SPIE, 1980, 228: 21-25.
- 8 Yang Huafeng, Liu Guilin, Rao Changhui, *et al.*. Spatial frequency analysis of wavefront compensation capabilities of deformable mirror [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1845-1848.  
杨华峰, 刘桂林, 饶长辉, 等. 变形镜波前补偿能力的空间频域分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1845-1848.
- 9 Zhang Deliang, Jiang Wenhan, Wu Xubin, *et al.*. Compensation effect of adaptive optics system for atmosphere induced wavefront perturbation II. analysis of the results for light propagation in horizontal atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(10): 1372-1379.  
张德良, 姜文汉, 吴旭斌, 等. 自适应光学对大气扰动波前的补偿效果研究 II. 水平大气传输时的结果分析[J]. 光学学报, 1998, 18(10): 1372-1379.
- 10 R E Wagner. Imagery Utilizing Multiple Focal Planes [D]. America: University of Arizona, 1976.
- 11 R K Tyson. Using the deformable mirror as a spatial filter: application to circular beams [J]. Appl Opt, 1982, 21(5): 787-793.
- 12 Zhou Renzhong. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. 252-257.  
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1996. 252-257.
- 13 Ning Yu, Yu Hao, Zhou Hong, *et al.*. Performance test and closed-loop correction experiment of a 20-element bimorph deformable mirror [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4717-4723.  
宁禹, 余浩, 周虹, 等. 20单元双压电片变形镜的性能测试与闭环校正实验研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4717-4723.
- 14 Ling Ning. Wavefront correctors of adaptive optics [J]. Optical Technology, 1998, (3): 12-16.  
凌宁. 自适应光学波前校正器[J]. 光学技术, 1998, (3): 12-16.
- 15 Yan Zhaojun, Li Xinyang, Rao Changhui. Numerical simulation of a prediction control algorithm for close-loop adaptive optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0101003.  
颜召军, 李新阳, 饶长辉. 一种自适应光学闭环系统预测控制算法的仿真研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0101003.
- 16 Rao Xuejun, Ling Ning, Jiang Wenhan. Experiment research of influence function measurement of deformable mirror using digital interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(10): 1446-1449.

- 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—1449.
- 17 Fu Fuxing, Zhang Bin. Effect of wavefront phase distortion correction [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 375—380.
- 付福兴, 张 彬. 畸变波前相位校正效果分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 375—380.
- 18 M A Ealey, J F Washeba. Continuous facesheet low voltage deformable mirrors [J]. Opt Eng, 1990, 29(10): 1191—1198.
- 19 Yu Ning, Hong Zhou, Hao Yu, *et al.*. Thermal stability test and analysis of a 20-actuator bimorph deformable mirror [J]. Chin Phys B, 2009, 18(3): 1089—1095.

栏目编辑: 王晓球