

基于变形镜热形变预估模型的自校正效果分析

胡小川¹ 王 度^{2,3*} 陈丽霞¹ 张 彬¹

¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 成都 610041

³中国工程物理研究院太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 在波前校正过程中,变形镜(DM)在强激光连续辐照(CW)下会产生热形变,进而对入射光引入附加波前畸变,从而制约了变形镜的波前校正效果,致使光束质量改善效果变差。从变形镜热形变面形的 Zernike 多项式分解出发,建立了强激光连续辐照下变形镜的热形变预估模型,根据预估所得的热形变面形,模拟计算得到了变形镜的驱动器控制信号参数,进而驱动变形镜对其自身的热形变面形进行了实时补偿。仿真结果表明,该自校正方法能有效补偿变形镜自身的热形变面形,减小变形镜热形变对其校正能力的影响;采用局部换热方式只能在一定程度上减小变形镜形变面形引起的平移相差和离焦相差,对光束质量的改善效果也比较有限,而该自校正方法能有效减小热形变引起的光程差,从而对光束质量起到明显的改善作用。

关键词 激光器; 预估模型; 自校正; 变形镜; 热形变

中图分类号 TN248; O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1202001

Effect Analysis of Self-Correction Method Based on the Prediction Model of Deformable Mirror with Thermal Deformation

Hu Xiaochuan¹ Wang Du^{2,3} Chen Lixia¹ Zhang Bin¹

¹College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

³Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In the process of wavefront correction, the thermal deformation appears on deformable mirrors(DMs) radiated by high-power continuous wave (CW) laser, leading to the additional wavefront distortion to the incident laser, and further the restriction of the correction ability of deformable mirror and the degradation of the beam quality. A prediction model of deformable mirror with thermal deformation radiated by high-power continuous wave laser is presented based on Zernike polynomial decomposition. According to the prediction of the thermal deformation of the deformable mirror, the control signal of the actuators have been obtained by finite element simulation, and further control the actuators to compensate the thermal deformation distribution of the deformable mirror in real time. Simulation results indicate that, the self-correction method can compensate the thermal deformation distribution of the deformable mirror effectively and reduce the influence of thermal deformation on the correction ability of the deformable mirror. As a reference, the local heat transfer method can only reduce the piston and defocus of the distorted wavefront caused by the thermal deformation of the deformable mirror to a certain extent, and the effect on beam quality is not efficient enough. However, the self-correction method can

收稿日期: 2015-07-27; 收到修改稿日期: 2015-08-28

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术实验室基金(2014HEL03)、苏州大学省级重点实验室开放课题(KJS1404)

作者简介: 胡小川(1990—),男,硕士研究生,主要从事变形镜热效应、光束传输与控制等方面的研究。

E-mail: 505823000@qq.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,博士,教授,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

*通信联系人。E-mail: wdxz@foxmail.com

eliminate almost all the optical path difference caused by the thermal deformation of the deformable mirror and further improve the beam quality effectively.

Key words lasers; prediction model; self-correction; deformable mirror; thermal deformation

OCIS codes 140.1550; 140.3460; 230.4040

1 引言

在强激光连续辐照下,光学元件的热形变随着入射光功率和激光辐照时间的增加变得更加明显,光束质量也随之下降^[1-3]。已有研究表明,由于离散式的驱动器分布以及薄形镜面结构的影响,变形镜在强激光连续辐照下也会出现明显的热形变面形,致使其在对畸变波前进行校正的过程中会对入射波前引入附加畸变,从而制约了变形镜的校正能力^[4-7]。Qiao等^[4]通过实验与有限元仿真对变形镜的热形变面形进行了分析,并指出变形镜驱动器的离散分布致使其热形变面形不同于普通反射镜;彭家琪等^[5]从变形镜的结构参数入手,分析了变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响;Lee等^[6]建立了水冷变形镜的有限元模型,分析了水冷散热对变形镜温升的影响,但其结构较为复杂,且需要较多的水流通来实现降温效果;胡小川等^[7]从便于应用的角度出发,针对常用的吹风散热方式提出了局部对流换热的思想,即根据入射光斑尺寸来选择合适的对流换热区域,从而减小变形镜镜面的温度梯度及热形变面形峰谷(PV)值,但其改善效果与理想状态仍存在一定差距。因而,针对强激光连续辐照下变形镜热形变所带来的影响,目前尚缺乏一种十分简单而有效的解决方法。

本文在已有研究工作的基础上,从变形镜热形变面形的Zernike多项式分解出发,结合热传导机理,建立了变形镜热形变预估模型,并以此作为待校正目标函数,提出了变形镜热形变的自校正方法。在此基础上,定量分析了该自校正方法对变形镜热形变面形的改善效果及其对变形镜校正能力的影响,并比较了局部对流换热和自校正方法对光束质量的改善效果。

2 模型建立

在自适应光学中,变形镜通过波前探测器件实时探测入射光波前畸变,进而根据探测的波前畸变经拟合获得驱动电压参数,从而对入射畸变进行校正。由于变形镜镜面比普通反射镜更薄,且驱动器离散分布,致使其在强激光连续辐照下的热形变比普通反射镜更加明显^[7]。为此,本文建立了光学元件的热形变预估模型,并针对变形镜自身的热形变开展自校正分析。

2.1 热形变预估模型

强激光辐照下,光学元件的热形变面形均呈现出“中间高,边缘低”的特点^[1-2]。以某变形镜为例,在强激光辐照下其归一化热形变面形如图1(a)所示,对该热形变面形进行Zernike多项式分解,得到前65阶Zernike系数,其结果如图1(b)所示。

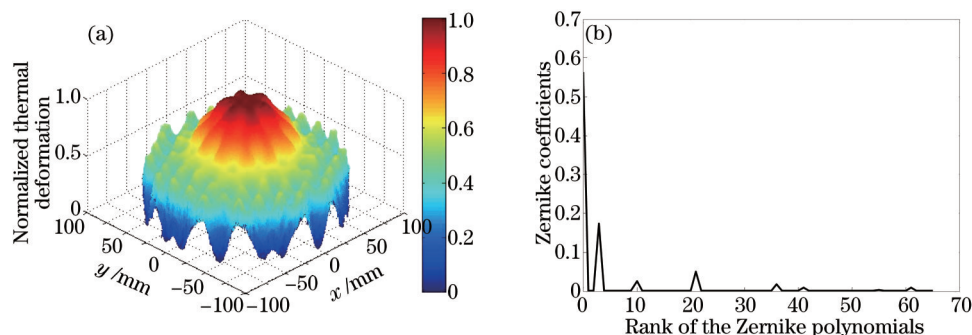


图1 变形镜热形变面形及其前65阶Zernike系数。(a)热形变面形;(b)各阶Zernike系数

Fig.1 Thermal deformation distribution of deformable mirror and its first 65 Zernike coefficients.

(a) Thermal deformation distribution; (b) Zernike coefficient of each order

从图1可以看出,对于变形镜的热形变面形,除了含有较大的平移项(第0项)和离焦项(第3项)外,还包含了少量的球差项(第10项)和其他高阶项。在Zernike多项式中,平移项代表波前的平均光程差,离焦项表示

波前的高斯或近轴特性。因而,强激光辐照下光学元件的热形变面形可近似为高斯分布:

$$f(x,y) = A + B \cdot \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{(c \cdot w_0)^2}\right], \quad (1)$$

式中 w_0 为入射光照射在镜面上的光束半宽度, A, B, c 为实数, A, B 表征了该高斯分布的整体大小, c 表征了该高斯分布与入射光束宽度的比例关系, 对于相同的入射光形态, c 为常数。实际计算过程中, 可通过最小二乘法将(1)式与元件热形变面形进行拟合来求解 A, B, c 。

对于同一元件, 其热形变的明显程度主要与激光能量在其内部沉积的多少及热传导的快慢有关。在相同时间内, 沉积的激光能量越多、热传导越慢, 则元件的热形变面形就越明显。而(1)式中 A, B 两参数与高斯分布的幅值有关, A, B 两参数的值越大, 其高斯分布的 PV 值也越大。因此, 可认为(1)式中的 A, B 参数近似表征了激光能量在元件内部的积累和传导, 因而 A, B 可看作是与能量积累与传导有关的函数, 即

$$\begin{aligned} A &= f_1(E, C), \\ B &= f_2(E, C), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 E 表示能量的积累, C 表示能量的热传导。

在不考虑入射光斑尺寸的情况下, 根据能量公式及热传导方程可知, 对于同一光学元件, 激光能量的积累与入射光功率密度 P 和激光辐照时间 T 呈线性关系, 而能量的传导与入射光功率密度 P 呈线性关系, 与激光辐照时间 T 呈二次多项式关系。于是有

$$\begin{aligned} E &= m_1 \cdot PT, \\ C &= (m_2 T + m_3 T^2)P, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 m_1, m_2, m_3 为实数。于是, A, B 可以表示为

$$\begin{aligned} A &= (k_1 T + k_2 T^2)P, \\ B &= (a \cdot k_1 T + b \cdot k_2 T^2)P, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 k_1, k_2, a, b 为实数。通过代入 T_1, T_2 两个时刻变形镜的热形变面形数据, 可以拟合得到相应的 A_1, B_1 和 A_2, B_2 , 进而可得到

$$\begin{cases} k_1 = \frac{A_1 T_2^2 - A_2 T_1^2}{PT_1 T_2 (T_2 - T_1)} \\ k_2 = \frac{A_2 T_1 - A_1 T_2}{PT_1 T_2 (T_2 - T_1)} \\ a = \frac{B_1 T_2^2 - B_2 T_1^2}{A_1 T_2^2 - A_2 T_1^2} \\ b = \frac{B_2 T_1 - B_1 T_2}{A_2 T_1 - A_1 T_2} \end{cases}, \quad (5)$$

进一步将 k_1, k_2, a 和 b 代入(1)式, 即可得到变形镜的热形变面形的预估函数。

2.2 热形变的自校正模型

根据本文提出的热形变预估模型, 可以得到不同条件下变形镜热形变的预估面形, 以此作为待校正目标函数, 从而可以控制变形镜对其进行补偿。在此过程中, 需要确定各驱动器的控制信号。通常情况下, 可使用影响函数的方式来表征单个驱动器作用时变形镜的拟合面形^[8]:

$$I_i(x,y) = \exp\{\ln b \cdot [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] / d^2\}, \quad (6)$$

式中 d 为驱动器间距, b 为交连值, (x_i, y_i) 为驱动器 i 的位置坐标。当多个驱动器工作时, 变形镜的拟合面形表示为^[9]

$$M(x,y) = \sum_{i=1}^N H_i \cdot I_i(x,y), \quad (7)$$

式中 H_i 为 i 号驱动器的控制信号, $M(x,y)$ 为变形镜的拟合面形。

通过最小二乘法使与变形镜拟合面形 $M(x,y)$ 与热形变预估面形 $f(x,y)$ 之和最小, 等价于使其方差取极小值

$$\sigma^2 = \iint [M(x,y) + f(x,y)]^2 dx dy, \quad (8)$$

从而求得变形镜驱动器的控制信号矩阵 \mathbf{H} 。

2.3 变形镜模型

根据文献[7]所示方法,建立 85 单元变形镜模型进行仿真分析,其驱动器排布如图 2 所示。变形镜镜面直径为 190 mm,厚度为 2.5 mm,极头间距为 20 mm,直径为 8 mm,长度为 10 mm。极头为镜面与驱动器间的连接单元,其材料与镜面相同。

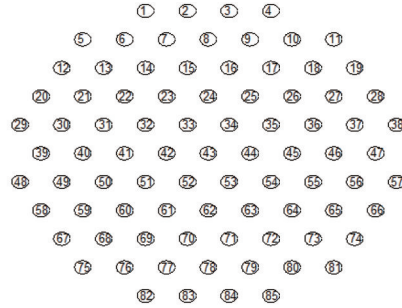


图 2 变形镜驱动器分布示意图

Fig.2 Schematic illustration of the actuators of deformable mirror

变形镜的膜系设计为 $\text{Sub}/(\text{HL})^9\text{H}/\text{Air}(\lambda_0=1.315 \mu\text{m}, \text{Sub 为 Si}, \text{H 为 TiO}_2, \text{L 为 SiO}_2)$, 相关材料参数如表 1 所示。

表 1 膜与基底热物理性质参数

Table 1 Thermo-physical properties of films and substrates

Material	Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Specific heat /($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Heat conductivity /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Thermal expansion / K^{-1}	Young's modulus /GPa	Poisson ratio	Refractive index
TiO ₂	3800	1368	1.8	9×10^{-6}	230	0.27	$2.21-i5.0\times 10^{-5}$
SiO ₂	2100	787	3.53	5.8×10^{-7}	73.1	0.17	$1.44-i1.0\times 10^{-5}$
Si	2329	733	173.6	4.15×10^{-6}	130.91	0.266	$3.44-i2.4\times 10^{-8}$

针对 $1.315 \mu\text{m}$ 连续激光正入射的情况,运用 Macleod 膜系设计软件分析,得到该膜系中单层 TiO₂ 薄膜的厚度为 148.76 nm,单层 SiO₂ 薄膜的厚度为 228.30 nm,膜系反射率 R 为 99.9638%,透射率 T 为 0.0228%,吸收率 A 为 0.0134%。

3 仿真分析

假设入射光为圆形平顶光束,其功率密度为 $5000 \text{ W}/\text{cm}^2$,光束半宽为 40 mm。根据上述分析模型,分别对激光连续辐照 10 s 和 20 s 时变形镜的热形变面形进行仿真,得到其热形变面形如图 3 所示。

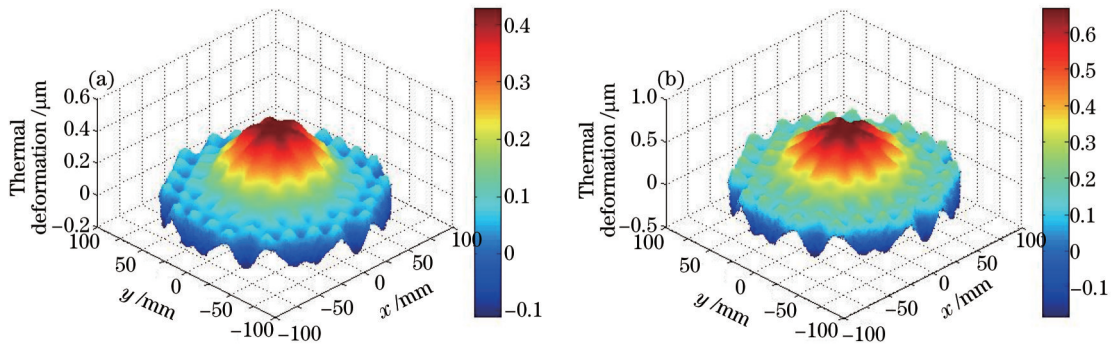


图 3 变形镜热形变分布。(a) 10 s; (b) 20 s

Fig.3 Thermal deformation distribution of deformable mirror. (a) 10 s; (b) 20 s

通过(1)式对 T_1 时刻的热形变面形进行拟合,得到 $A_1=-6.33\times 10^{-8}, B_1=4.69\times 10^7$; 对 T_2 时刻的热形变面形进行拟合,得到 $A_2=-3.78\times 10^{-8}, B_2=7.05\times 10^7$; 此外有 $c\approx 1.5$ 。将 A_1, A_2, B_1, B_2 代入(5)式,计算得到 $k_1=-2.16\times 10^{-12}, k_2=8.89\times 10^{-14}, a=-5.43, b=-2.61$ 。由此得到适用于上述变形镜模型的热形变预估函数为

$$f(x,y) = (-2.16 \times 10^{-12}T + 8.89 \times 10^{-14}T^2)P + (1.17 \times 10^{-11}T - 2.32 \times 10^{-13}T^2)P \cdot \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{(1.5 \cdot w_0)^2}\right]. \quad (9)$$

3.1 自校正效果分析

以(9)式所示的热形变预估模型作为待校正目标函数,从而可以计算出相应的驱动器控制信号矩阵 \mathbf{H} , 将其作为边界条件代入有限元分析过程,即可得到不同入射光参数条件下,变形镜自校正后的面形。以入射光功率为 8000 W/cm^2 , 光束半宽为 40 mm 为例,图4给出了激光连续辐照 25 s 后,变形镜的热形变面形、使用热形变预估模型得到的预估面形,以及经自校正后的形变面形。

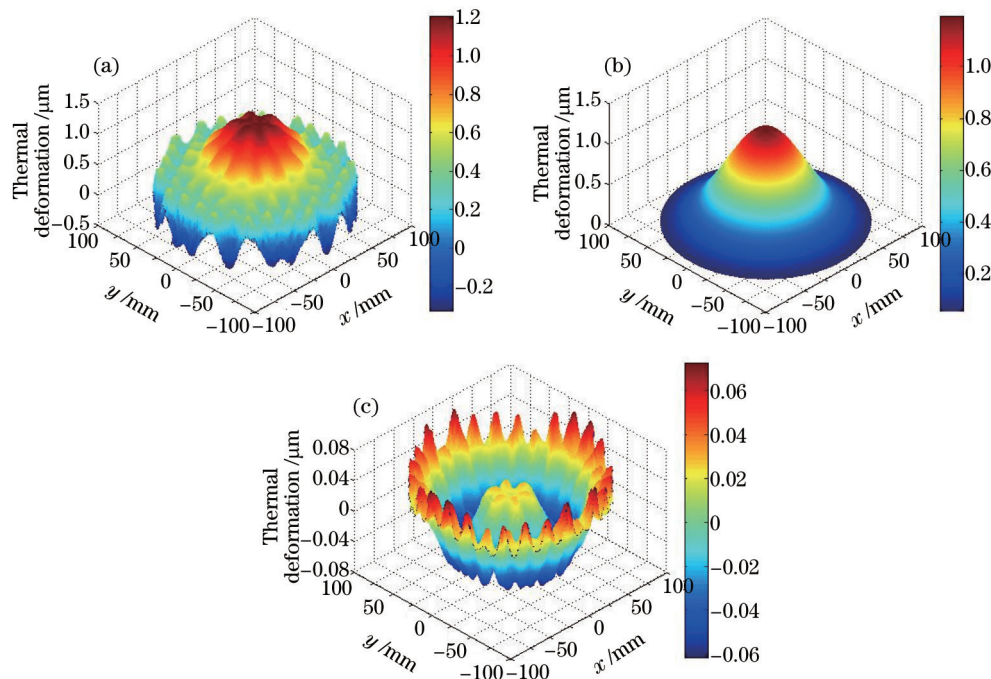


图4 变形镜的面形分布。(a) 实际热形变面形; (b) 预估面形; (c) 自校正后的面形

Fig.4 Distribution of the deformable mirror surface. (a) Thermal deformation; (b) prediction; (c) self-correction

对比图4(a)、(b)可以看出,使用本文建立的预估模型计算得到的热形变面形与实际热形变面形的PV值近似相等。需要说明的是,变形镜热形变面形中包括了许多与极头排布有关的局部凸起,而该预估模型并没有对这些局部凸起加以考虑。从图4(a)、(c)可以看出,根据预估模型对变形镜热形变进行自校正后,其形变面形的PV值约为 $0.14 \mu\text{m}$,明显小于自校正前的热形变面形(PV值约为 $1.6 \mu\text{m}$),表明该自校正方式能对变形镜的热形变起到补偿效果。为进一步验证该自校正方法的适用性,图5给出了不同入射光功率,光束半宽以及激光辐照时间条件下,自校正前后变形镜形变面形的PV值和均方根(RMS)值。

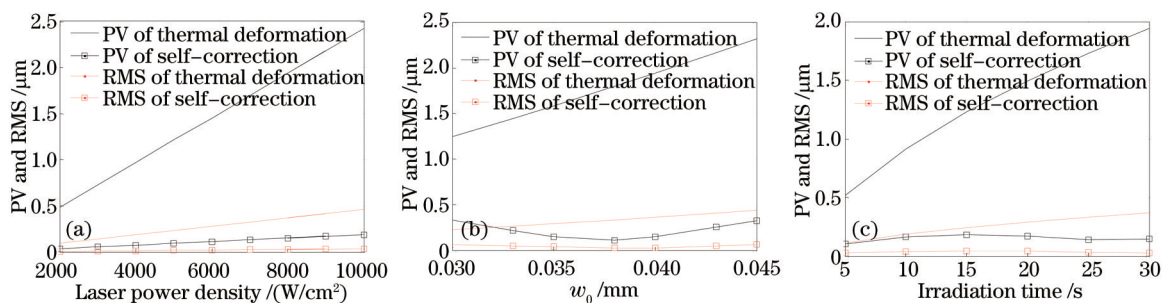


图5 不同情况下的面形PV值和RMS值。(a) 不同光功率密度; (b) 不同光束半宽; (c) 不同辐照时间

Fig.5 PV value and RMS value in different situations. (a) Different laser power densities; (b) different beam waists;

(c) different irradiation time

由图5可知,在强激光连续辐照下,变形镜热形变面形的PV值与RMS值随着沉积能量的增加而增大。在使用本文提出的自校正方法后,变形镜热形变面形的PV值与RMS值明显减小,进一步证明该自校正方法

能适用于不同入射光参数条件下变形镜热形变的实时补偿。此外,从图 5(a)和(c)还可以看出,PV 值和 RMS 值随入射光功率密度的变化曲线近似为一直线,而随激光辐照时间的变化曲线则为曲线,这与(3)式所述规律相吻合。

3.2 对波前校正效果的影响

在变形镜的实际工作中,入射波前通常是存在一定波前畸变的,而变形镜对畸变波前的校正作用相当于 1 个高通滤波的过程^[10]。假定畸变波前 $\phi(x,y)$ 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 L 可表示为^[11]

$$L = \frac{\mathcal{F}(R)}{\mathcal{F}(\phi)}. \quad (10)$$

当变形镜存在热形变时,残余波前 $R(x,y)$ 可以表示为

$$R(x,y) = \phi(x,y) - M(x,y) + \varphi(x,y), \quad (11)$$

式中 $M(x,y)$ 表示变形镜在校正入射波前时的拟合面形, $\varphi(x,y)$ 为变形镜热形变引起的相位畸变。

假设入射光功率密度为 8000 W/cm^2 , 光束半宽为 40 mm , 激光辐照时间为 25 s , 根据文献[12]所述方法构建入射波前 $\phi(x,y)$ 如图 6(a)所示,则此时变形镜的滤波函数如图 6(b)所示。图中,case 1 表示没有热形变时变形镜的滤波效果,case 2 表示有热形变时变形镜的滤波效果,case 3 表示使用自校正方法后变形镜的滤波效果。

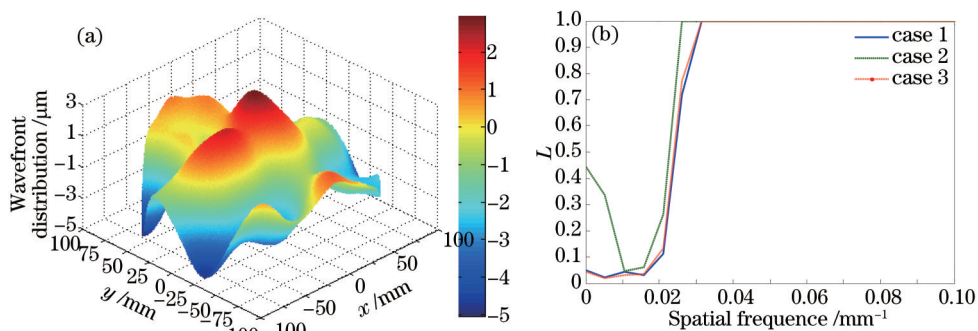


图 6 入射畸变波前分布和不同条件下变形镜的滤波函数。(a) 入射畸变波前;(b) 滤波函数

Fig.6 Distribution of the incident wavefront and filter function curves of deformable mirror in different situations.

(a) Distribution of the incident wavefront; (b) filter function curves

从图 6(b)可以看出,在空间频率低于 0.03 mm^{-1} 的部分,case 2 明显高于 case 1,意味着变形镜的滤波效果变差,其中以空间频率低于 0.01 mm^{-1} 的部分尤为明显。而 0.01 mm^{-1} 的空间频率刚好与入射光斑尺寸相对应,间接表明热形变面形中与入射光斑尺寸相对应的低频成分才是影响变形镜校正效果的主要因素。此外,虽然在热形变预估模型中忽略了变形镜热形变的高频成分,但从图 6(b)中可以看出,case 1 与 case 3 基本重合,表明在使用自校正方法后,变形镜的滤波效果已近十分接近没有热形变时的情况。

3.3 与对流换热方式的比较

在传统方法中,常采用空气对流换热方式对元件进行吹风换热,从而抑制元件热形变对光束质量的影响。在此基础上,文献[7]从减小变形镜表面温度梯度分布的角度出发,提出了局部换热方式,尽可能地加强了对流换热的使用效果。

假设入射光功率密度为 8000 W/cm^2 , 光束半宽为 40 mm , 激光辐照时间为 25 s , 使用 Zernike 多项式对变形镜热形变面形进行分解,得到前 65 阶 Zernike 多项式系数如图 7 所示。图中,case 1 表示没有任何改善措施时的 Zernike 系数,case 2 表示使用局部换热方式时的 Zernike 系数,case 3 表示使用自校正方法时的 Zernike 系数。在局部换热方式中,为达到较好的换热效果,假设环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 气流温度为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$, 气流的换热系数达到最大值 $100 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

从图 7 可以看出,使用对流换热方式后,变形镜热形变引起的光程差中,平移项和离焦项得到了一定程度的抑制,但效果并不明显;而在使用本文提出的自校正方法后,平移项和离焦项得到了很大程度的削弱,同时其他高阶项也有一定程度的减小。由此可见,本文提出的自校正方法对变形镜热形变面形的改善效果

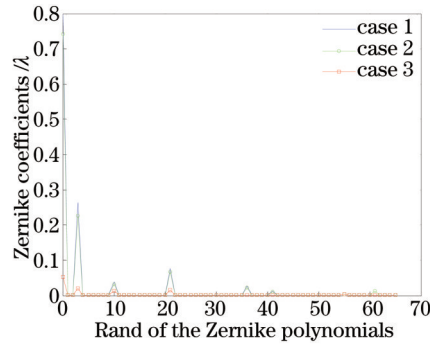


图 7 变形镜面形的前 65 阶 Zernike 系数

Fig.7 First 65 Zernike coefficients of deformation of deformable mirror

优于局部换热方式,且改善效果明显。

由于热形变面形对入射光场相位的影响,经镜面反射后的光束质量会随着热形变程度的增加而降低。入射光经变形镜反射后,热形变面形对入射波前引入的附加相移为反射表面沿镜面厚度方向位移的 2 倍。因此,假设入射波前为平面波,热形变对入射光场的影响可以表示为

$$U_1(x,y) = U_0(x,y)\exp[-2ik \cdot \varphi(x,y)], \quad (12)$$

式中 $U_0(x,y)$ 为入射光的光场分布, $U_1(x,y)$ 为反射光的光场分布, $\varphi(x,y)$ 表示变形镜的形变面形, k 为入射光波波矢。

本文利用 β 因子对激光光束质量进行评价^[13]

$$\beta = \sqrt{a_1/a_0}, \quad (13)$$

式中 a_1 和 a_0 分别表示插中功率比(PIB)为 86.5%时,实际光束和理想光束所对应的面积。 β 值越小,表明激光束在远场的能量集中度越高,光束质量也越好。

图 8 比较了不同入射激光参数条件下的光束质量。图中 case 1 表示仅考虑变形镜热形变时的光束质量, case 2 表示使用局部换热方式后的光束质量, case 3 表示使用自校正方法后的光束质量。

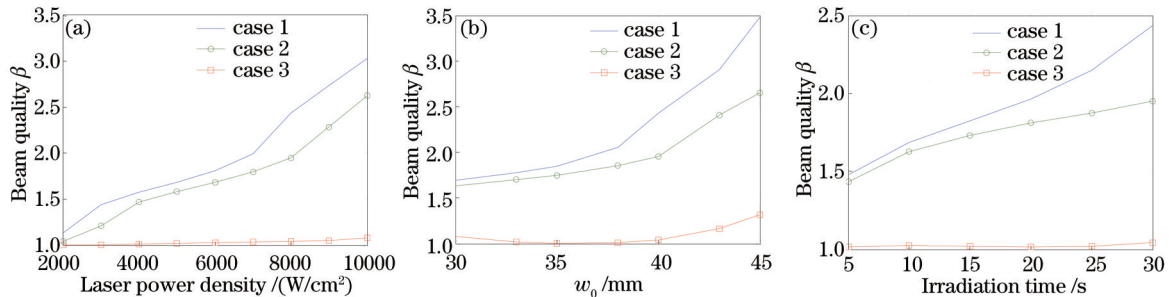


图 8 不同情况下的光束质量。(a) 不同光功率密度; (b) 不同光束半宽; (c) 不同辐照时间

Fig.8 Beam quality in different situations. (a) Different laser power densities; (b) different beam waists; (c) different irradiation time

从图 8 可以看出,在热形变的影响下,随着入射光功率密度、光束半宽以及激光辐照时间的增加,光束质量逐渐降低。而局部换热方法能在一定程度上提高光束质量,但其改善效果随着入射光功率密度的增强而变差。在使用本文提出的自校正方法后,光束质量趋近于理想情况,且改善效果几乎不受入射光功率密度的影响。

4 结 论

在强激光连续辐照下,变形镜的热形变会影响其校正能力,并对光束质量造成影响。在光学元件热形变分析的基础上,建立了基于高斯分布的热形变预估模型,进而对不同激光辐照条件下变形镜的热形变面形进行预估。在此基础上,以该预估模型作为待校正目标函数,计算出相应的变形镜驱动器控制信号,从而实现变形镜热形变的自校正。经自校正后,热形变面形引起的平移相差和离焦相差明显减小,变形镜的透

波效果也趋近于没有热形变时的情况。在此计算条件中,当入射激光为束宽 40 mm 的圆形平顶光束时,变形镜热形变对其滤波效果的影响主要体现在空间频率低于 0.01 mm^{-1} 的部分,即变形镜热形变面形中的低频成分是影响其校正能力的主要因素。与局部对流换热方法相比,提出的使用变形镜校正其自身热形变面形是一种更为主动和有效的方法。在此计算条件下,当入射光功率密度为 8000 W/cm^2 ,光束半宽为 40 mm,激光辐照时间为 30 s 时,在没有采取任何改善措施时表征远场光束质量的 β 因子约为 2.47,在使用局部换热方法后的 β 因子约为 1.97,而在使用自校正方法后的 β 因子约为 1.04。

从对光束质量的改善效果来看,自校正方法和局部换热方法均能对光束质量起到改善作用,但自校正方法对光束质量的改善效果明显优于局部换热方法,且改善效果几乎不受入射光功率密度和激光辐照时间的影响,因而该自校正方法特别适用于高功率连续激光系统。

参 考 文 献

- 1 Y Peng, Z Cheng, Y Zhang, *et al.*. Temperature distributions and thermal deformations of mirror substrates in laser resonators[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(27): 4824-4830.
- 2 Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Study of thermal deformations induced optical aberrations for Al_2O_3 mirror in an optical system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 39(10): 1002001.
周 琼,姜宗福,刁锋杰. 光学系统中白宝石分光镜的热变形像差分析[J]. *中国激光*, 2013, 39(10): 1002001.
- 3 Y Peng, F Peng, J Han. Influence of thermal deformations of resonators on propagation properties of laser annular beams through turbulent atmosphere[J]. *Opt Laser Technol*, 2013, 45(1): 272-277.
- 4 Qiao Xue, Lei Huang, Ping Yan, *et al.*. Research on the particular temperature-induced surface shape of a National Ignition Facility deformable mirror[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(2): 280-287.
- 5 Peng Jiaqi, Hu Xiaochuan, Chen Lixia, *et al.*. Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high-power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0514001.
彭家琪,胡小川,陈丽霞,等. 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0514001.
- 6 Lee J H, Lee Y C, Kang E C. A cooled deformable bimorph mirror for a high power laser[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2006, 10(2): 57-62.
- 7 Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, Zhang Bin. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0102003.
胡小川,彭家琪,张 彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0102003.
- 8 R K Tyson. Using the deformable mirror as a spatial filter: application to circular beams[J]. *Appl Opt*, 1982, 21(5): 787-793.
- 9 Tyson Robert K, Dale 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.
- 10 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.
- 11 Ma Xuemei, Han Kai, Zhang Bin. Prediction for wavefront correction effect of discrete deformable mirror based on filter function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0101002.
马雪梅,韩 开,张 彬. 基于滤波函数的分立变形镜波前校正效果预估[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0101002.
- 12 Fu Fuxing, Zhang Bin. Recovery of high frequency phase of laser beam with wavefront distortion[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0402009.
付福兴,张 彬. 激光束畸变波前高频相位的恢复[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0402009.
- 13 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1643-1653.
冯国英,周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1643-1653.

栏目编辑: 史 敏