

基于波前传感器标定优化的自适应光学校正方法

苏春轩^{1,2,3}, 董理治^{4**}, 樊新龙^{1,2}, 赖柏衡^{1,2,3*}, 马士青^{1,2,3}, 杨平^{1,2,3}, 许冰^{1,2,3}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴航天科工微电子系统研究院有限公司, 四川 成都 610213

摘要 在自适应板条固体激光器光束净化研究中, 基于最小二乘法的传统自适应光学系统以斜率残差平方和最小为校正目标。当激光器光束的波前畸变无法被变形镜完全补偿且补偿后仍然有大量的波前残差时, 斜率残差平方和最小不能等效于光束质量最优值, 因此该方法只能获得系统的次优解。针对此问题, 提出一种新颖的自适应光学校正方法。该方法以提高光束质量为目标, 根据波前畸变以及变形镜的校正能力, 使用优化算法对波前传感器的标定位置进行优化, 再使用传统自适应光学系统进行像差补偿。仿真结果表明, 相较于未进行标定优化的传统自适应光学系统, 使用该方法可以在变形镜校正能力有限的情况下有效提升自适应光学系统的校正效果。

关键词 自适应光学; 像差补偿; 板条固体激光器; 标定优化

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2305001

1 引言

板条固体激光器具有体积小、结构可靠等优点, 近年来在高功率激光器领域得到了广泛关注^[1-2]。然而受边缘效应的影响, 当板条固体激光器工作在高增益状态时, 在激光器输出光束的边缘部分会出现严重的波前畸变^[3-4]。为了对波前畸变进行补偿, 一种方式是使用与畸变波前相位共轭的自由曲面镜^[5], 然而由于激光器工作在高增益状态时, 输出的波前畸变是动态变化的, 因此使用该方法对波前畸变进行补偿是有限的。另一种是使用自适应光学技术对波前畸变进行动态补偿。自适应光学技术通过波前校正器对波前相位进行调制达到波前畸变补偿的作用^[6]。常用的自适应光学系统主要分为两类, 一类是使用波前传感器的传统自适应光学系统, 该方法通过波前传感器测量波前斜率数据反馈给波前控制器, 波前控制器使用波前复原算法, 根据波前斜率数据计算得到变形镜的控制电压并驱动变形镜对畸变的波前进行补偿。另一类是不使用波前传感器

进行波前测量的无波前自适应光学系统, 在该方法中, 通过对有关指标进行迭代优化实现对像差的校正^[7]。两类方法各有优缺点, 在传统自适应光学系统中, 通过直接测量波前信息并反馈控制的方式对像差进行校正, 在不考虑控制系统时延的条件下, 可以实现对像差的实时校正。然而由于波前传感器是通过离散采样的方式对波前信息进行采集, 会造成波前信息的丢失, 自适应光学系统性能的发挥也会受到限制^[6,8]。在无波前自适应光学系统中, 不需要使用波前测量设备, 通过搜索优化的方式进行畸变补偿, 可以最大程度地发挥自适应光学系统的像差补偿性能。然而对像差进行迭代优化校正需要耗费大量的时间^[9], 当系统输出像差动态变化时, 很难达到稳定。因此在高功率激光器光束净化领域里, 基于波前传感的传统自适应光学系统得到了更广泛的应用^[10-15]。

变形镜作为自适应光学系统中的核心器件, 其对像差的拟合能力在很大程度上影响着自适应光学系统整体的性能^[6]。变形镜的校正能力主要由驱动

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(11704382)

通信作者: *541769747@qq.com; **dong_lizhi@126.com

器的行程以及排布密度决定, 受限于材料、加工工艺、成本等因素, 其校正能力总是有限的。当板条激光器工作在高增益状态时, 由于受边缘效应影响, 其输出光束边缘区域的像差很容易超出变形镜的校正能力。为了得到更好的像差补偿效果, 最根本的方法是增加驱动器的行程量以及驱动器的空间密度, 或者使用多变形镜^[9,15], 然而这会造成自适应光学系统的复杂度与成本的增加。另一种有效的方式则是对自适应光学系统中的波前复原算法进行优化。该方式不需要改变原有自适应光学系统的结构, 可根据系统要求灵活调整, 中国科学院光电技术研究所的陈善球等人提出一种加权最小二乘波前复原算法, 通过改变权重值调整自适应光学系统对大像差的灵敏度, 使得板条固体激光器的光束质量得到进一步提升^[16]。然而权重的选择需要考虑到多方面的因素, 计算复杂, 使其在高功率激光器的光束净化应用中受到一定的限制。因此亟需一种更加简单可行的方法。

为充分发挥自适应光学系统中变形镜的像差补偿性能, 提高自适应光学系统对超过变形镜校正能力的波前畸变的校正效果, 提出一种基于波前传感器标定优化的自适应光学校正方法。该方法结合无波前自适应光学中搜索系统最优解的思想, 针对输入波前畸变, 以提升光束质量为优化目标, 以自适应光学系统的校正能力为基础, 通过虚拟优化的方式得到输入波前畸变经过传统自适应光学系统补偿后能得到的最优波前残差, 并以此残差对波前传感器的原始标定位置进行修正, 再使用自适应光学系统以优化后的标定位置为参考对输入波前畸变进行补偿。仿真结果表明, 该方法相较于未进行标定优化的传统自适应光学系统可以有效提升自适应光系统对具有超过变形镜校正能力的局部大相位梯度像差的波前畸变的校正效果。

2 基本原理

在传统自适应光学系统中, 根据不同的需求往往需要使用一束特定的光束对波前传感器进行标定以获得波前斜率计算的参考位置^[6]。在高功率激光器领域特别是高功率激光传输中, 要求输出的激光光束为无像差的平行光束, 因此使用无波前畸变的理想平行光对波前传感器进行标定。波前传感器的标定示意图如图 1 所示。

标定后, 斜率计算的参考位置记为 (x_0, y_0) , 标定位置的坐标可以通过重心法计算得到, 该公式可

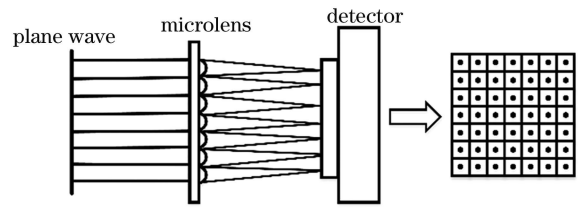


图 1 波前传感器标定示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wavefront sensor calibration

表示为

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\int x \cdot I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy} \\ y_0 = \frac{\int y \cdot I(x, y) dx dy}{\int I(x, y) dx dy} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $I(x, y)$ 为每个子孔径中的光强分布。当畸变的波前进入波前传感器时, 畸变波前对应的斜率 (S_x, S_y) 为

$$\begin{cases} S_x = \frac{1}{D} \iint_D \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} dx dy = \frac{\Delta x}{f} = \frac{x - x_0}{f} \\ S_y = \frac{1}{D} \iint_D \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial y} dx dy = \frac{\Delta y}{f} = \frac{y - y_0}{f} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $\Phi(x, y)$ 为输入畸变波前的相位, D 为每个子孔径的面积, (x, y) 为畸变波前的质心位置, $(\Delta x, \Delta y)$ 为质心的偏移量, f 为微透镜的焦距。图 2 为斜率计算的示意图, 其中“●”为无波前畸变的理想平行光对应的质心位置, “★”为输入畸变光束对应的质心位置。

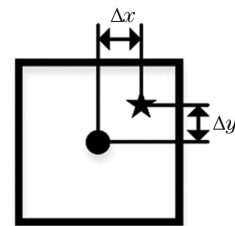


图 2 斜率计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of slope calculation

在获得畸变波前的斜率后, 使用波前复原算法即可计算得到变形镜的控制电压。其中基于最小二乘法的直接斜率法可以从斜率直接解算出变形镜的控制电压, 省去复杂的波前复原过程, 在自适应光学系统中得到广泛应用^[17]。通过直接斜率法, 变形镜的控制电压 V 与畸变波前斜率 S 之间的关系可表示为

$$V = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}, \quad (3)$$

式中 \mathbf{R} 为斜率与控制电压之间的复原矩阵。系统的最优控制电压 \hat{V} 通过最小二乘法获得, 表示为^[18]

$$\begin{cases} \hat{V} = \operatorname{argmin} \| S - \mathbf{V}\mathbf{G} \|^2 \\ \sigma^2 = \sum_{i=1}^m (S_i - \hat{S}_i)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{G} 为复原矩阵 \mathbf{R} 的伪逆矩阵; S_i 为畸变波前在第 i 个子孔径中的斜率; \hat{S}_i 为对变形镜施加最优控制电压后得到的斜率; m 为子孔径的数量; σ^2 为校正后的斜率残差。从最小二乘法的原理可知, 系统的校正结果是使校正后波前整体的斜率残差平方和最小, 因此越大的斜率在波前复原中会有更大的系统响应。

当波前畸变可以完全被变形镜校正时, 使用最小二乘法可以获得很好的校正结果, 然而当波前畸变存在变形镜无法完全补偿的局部大相位梯度时, 补偿后的波前中仍然会存在大量的波前残差, 这一部分残差会导致变形镜更关注于无法校正的大像差的校正。当变形镜为具有连续面型的变形镜时, 对于大像差的校正会扩散到周围从而影响到小像差区域的校正。在板条固体激光器输出的光束中, 当波前畸变无法被完全补偿时, 具有小像差的中心区域光束对远场衍射极限区域的能量具有更大的贡献^[16]。据此本文对传统自适应光学系统的校正策略进行优化, 对于输入的波前畸变, 当变形镜校正能力有限且校正后仍然有大量波前残差时, 不再以波前残差最小为校正目标, 而以更好的光束质量为校正目标。

从传统自适应光学系统的原理可知, 系统校正的基准是波前传感器的标定光束的波前相位。当改变标定光束波前相位时, 便会得到不同的校正结果。

基于此, 提出一种基于波前传感器标定优化的自适应光学校正方法。在该方法中, 首先使用无像差的理想平行光束作为标定光对波前传感器测量波前畸变的参考位置进行标定, 当得到畸变波前的相位信息后, 根据变形镜的校正能力, 使用优化算法搜索输入畸变波前在变形镜补偿后所能达到的光束质量最优时的残差波前。使用优化算法寻优得到的残差波前相位 $\hat{\Phi}(x, y)$ 可表示为

$$\hat{\Phi}(x, y) = \Phi(x, y) + \varphi(x, y), \quad (5)$$

式中, $\Phi(x, y)$ 为输入波前相位, $\varphi(x, y)$ 为使用优化算法得到的补偿波前。然后以残差波前相位作为波前传感器新的标定位置 (x_c, y_c) , 图 3 为使用优化算法进行标定优化后的斜率计算示意图。

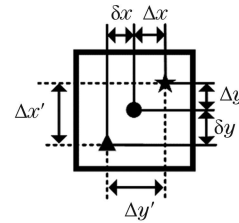


图 3 进行标定优化后的斜率计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of slope calculation after calibration optimization

其中, “▲”为使用优化算法得到的新校正参考位置, δx 和 δy 分别是新的校正参考位置与使用理想平行光得到的参考位置之间的偏移量。完成标定位置修正后, 畸变波前对应的质心偏移 $(\Delta x', \Delta y')$ 可表示为

$$\begin{cases} \Delta x' = x - x_c = \Delta x + \delta x \\ \Delta y' = y - y_c = \Delta y + \delta y \end{cases}, \quad (6)$$

反馈给波前控制器的波前斜率为

$$\begin{cases} S'_x = \frac{1}{D} \iint_D \frac{\partial \hat{\Phi}(x, y)}{\partial x} dx dy = \frac{x - x_c}{f} = \frac{x - x_0 + \delta x}{f} \\ S'_y = \frac{1}{D} \iint_D \frac{\partial \hat{\Phi}(x, y)}{\partial y} dx dy = \frac{y - y_c}{f} = \frac{y - y_0 + \delta y}{f} \end{cases}, \quad (7)$$

通过直接斜率法得到变形镜的控制电压为

$$\mathbf{V}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}', \quad (8)$$

校正后斜率残差为

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^m (S'_i - \hat{S}'_i)^2 = \sum_{i=1}^m (S_i - \hat{S}_i + S_i^\circ)^2. \quad (9)$$

式中, S_i° 为波前传感器的第 i 个子孔径中使用标定优化方法前后产生的斜率偏移。

3 方法验证

通过建立板条激光器自适应光学校正系统模型对提出的方法开展进一步研究, 为方便讨论, 使用衍射极限倍数因子 β 对光束质量进行评价^[19-21]。在建立的模型中, 系统有效通光孔径为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 光束波长为 $1.064 \mu\text{m}$, 使用 59 单元变形镜进行像差校正, 变形镜中单个驱动器的行程量为 $3 \mu\text{m}$, 驱

驱动器间距为 8 mm,驱动器按六边形排布。波前传感器为具有 10×10 个子孔径的夏克哈特曼波前传感器,变形镜相邻驱动器产生的最大斜率对应于子孔径中光斑偏移为 3 pixel。变形镜驱动器与波前传感器子孔径的对应关系如图 4 所示,其中圆形为驱动器,方形为子孔径。波前传感器使用无像差的理想平行光束进行标定,图 5(a)为标定光束的波前,图 5(b)为标定光束对应的远场光强分布。其中 RMS 为输入波前整体的均方根误差,PV 为输入波前的峰谷值。

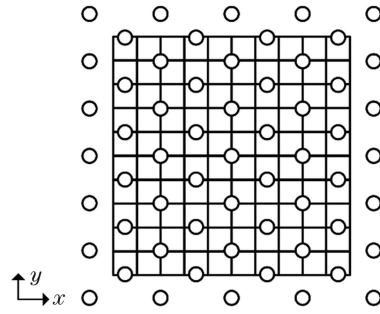


图 4 变形镜驱动器与波前传感器子孔径对应关系图
Fig. 4 Relationship between actuators and sub-apertures

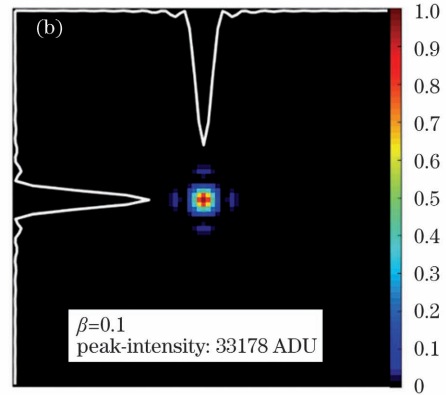
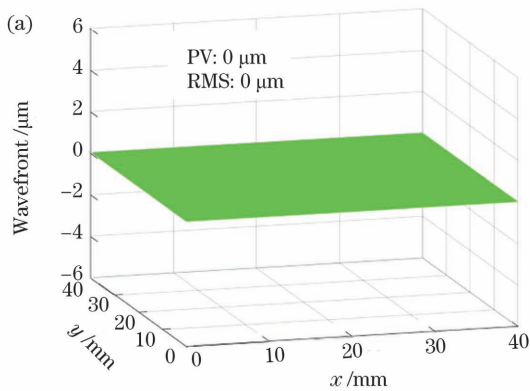


图 5 波前传感器标定光束的波前与对应的远场光强分布。(a)标定光束的波前;(b)标定光束对应的远场光强分布

Fig. 5 Wavefront sensor calibration beam wavefront and corresponding far-field spot intensity distribution.

(a) Calibration beam wavefront; (b) corresponding far-field spot intensity distribution

根据模式法复原波前的原理^[22-23],方形光束的波前 $\Phi(x, y)$ 可以表示为二维 Legendre 多项式的线性组合,即为

$$\Phi(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i L_i^{mm}(x, y), \quad (10)$$

式中, $L_i^{mm}(x, y)$ 为第 i 阶 Legendre 多项式, a_i 为其在波前中的权重系数。第 i 阶 Legendre 多项式可表示为

$$\begin{cases} L_i^{mm}(x, y) = \sqrt{(2m+1)(2n+1)} L_i^m(x) L_i^n(y) \\ L_i^m(x) = \frac{1}{2^m n!} \frac{d^m}{dx^m} [(x^2 - 1)^m], & x \in [-1, 1], y \in [-1, 1] \\ L_i^n(y) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dy^n} [(y^2 - 1)^n] \end{cases} \quad (11)$$

式中 $L_i^m(x)$ 和 $L_i^n(y)$ 分别为 Legendre 多项式的一维表达形式。

根据板条固体激光器输出波前的特点,使用二维 Legendre 多项式组合得到了一个具有严重边缘畸变的波前作为系统输入,如图 6(a)所示,输入波前整体的均方根误差(RMS)值为 $0.55 \mu\text{m}$,由于边缘畸变的影响,输入波前的峰谷(PV)值为 $5.62 \mu\text{m}$ 。图 6(b)所示为系统输入波前对应的远场光强分布。输入波前对应远场的光束质量为 $\beta = 5.1$,光斑峰值强度为 4345 ADU。

首先,使用优化算法搜索自适应光学系统对以上波前畸变进行校正后所能达到的系统最优解,其校正后的结果如图 7 所示。采用优化算法校正后波前残差的 PV 值和 RMS 值分别为 $6.14 \mu\text{m}$ 和 $0.65 \mu\text{m}$,相应的光束质量为 $\beta = 1.8$,光斑峰值强度为 21474 ADU。

然后分别采用传统的标校方法和本文提出的方法对畸变波前进行校正,其中优化标定所用的波前为采用优化算法校正后得到的波前。校正后的结果如图 8 所示,其中图 8(a)和图 8(b)为采用传统方法

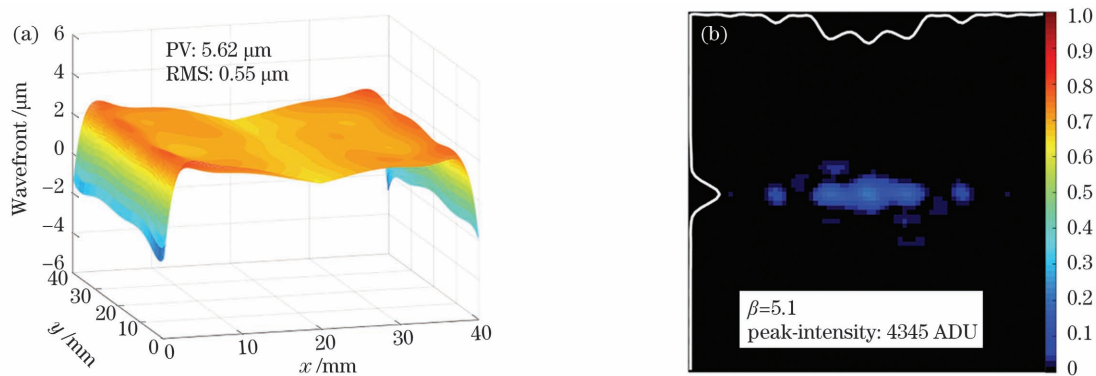


图 6 系统输入畸变波前和远场光强分布。(a)系统输入畸变波前;(b)远场光强分布

Fig. 6 Input distorted wavefront and far-field spot intensity distribution. (a) Input distorted wavefront; (b) far-field spot intensity distribution

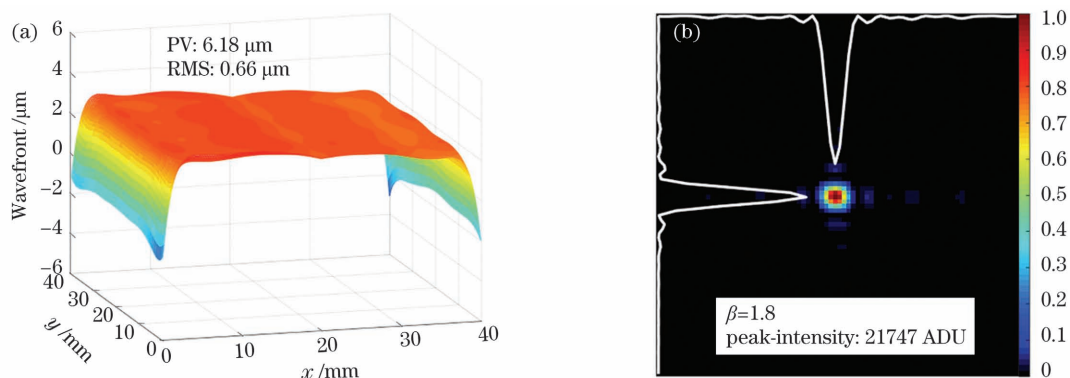


图 7 使用优化算法校正后的结果。(a)波前;(b)远场光斑

Fig. 7 Correction results with optimization algorithm. (a) Wavefront; (b) far-field spot

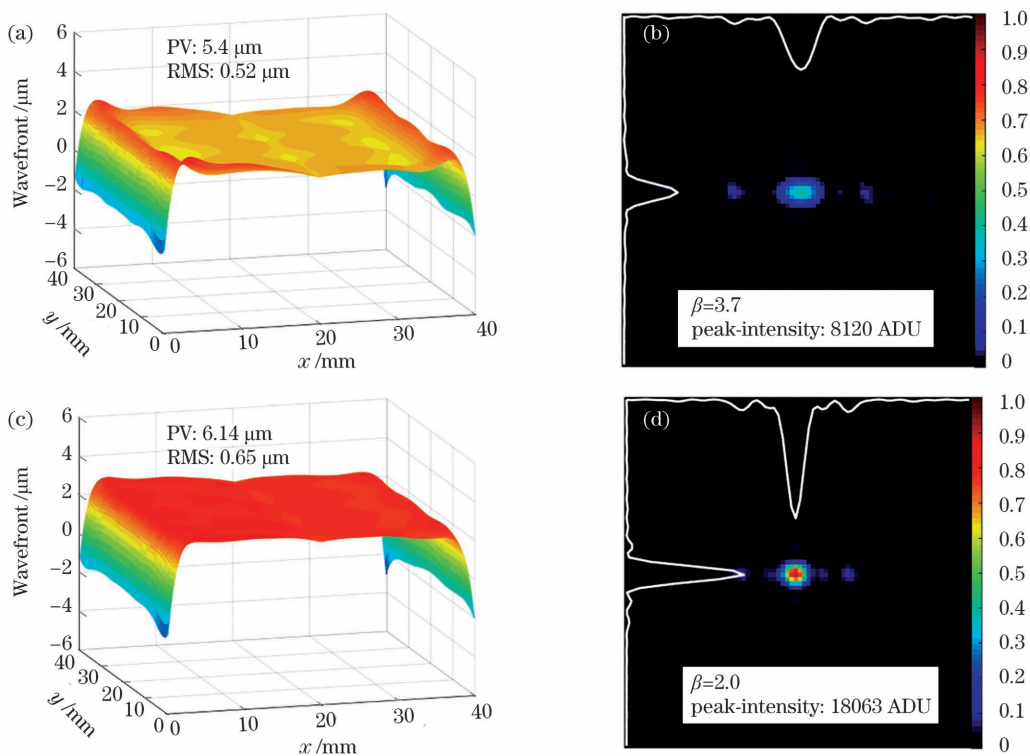


图 8 使用不同方法的校正结果。(a)和(b)为采用传统方法的校正结果;(c)和(d)为本文方法的校正结果

Fig. 8 Correction results with different methods. (a) and (b) are correction results with traditional method; (c) and (d) are correction results with proposed method

校正后的结果,校正后波前 PV 值以及 RMS 值分别减小到 $5.4 \mu\text{m}$ 和 $0.52 \mu\text{m}$,光束质量由 $\beta=5.1$ 提升到 $\beta=3.7$,远场光斑峰值强度由 4345 ADU 提升到 8120 ADU。图 8(c)和图 8(d)为使用本文方法得到的校正结果,校正后波前 PV 值和 RMS 值分别为 $6.18 \mu\text{m}$ 和 $0.66 \mu\text{m}$,远场光束质量为 $\beta=2.0$,远场光斑峰值强度为 18063 ADU。

图 9 为畸变波前在夏克-哈特曼波前传感器上的光斑阵列图及其在 x 方向和 y 方向的斜率分布。

从图中可以看出,当使用理想平行光束对波前传感器进行标定时,畸变波前在 x 方向的边缘畸变会出现较大的斜率信号,在波前复原算法中占有更大的比重。在使用优化标定之后,与边缘畸变对应的斜率信号 PV 值由 7.9 pixel 减少到 3.0 pixel,此时,边缘畸变在波前复原算法中所占比重也同时减小。经过优化标定后,自适应光学系统对无法校正的大像差的灵敏度下降,可以更加专注于可校正像差的校正。

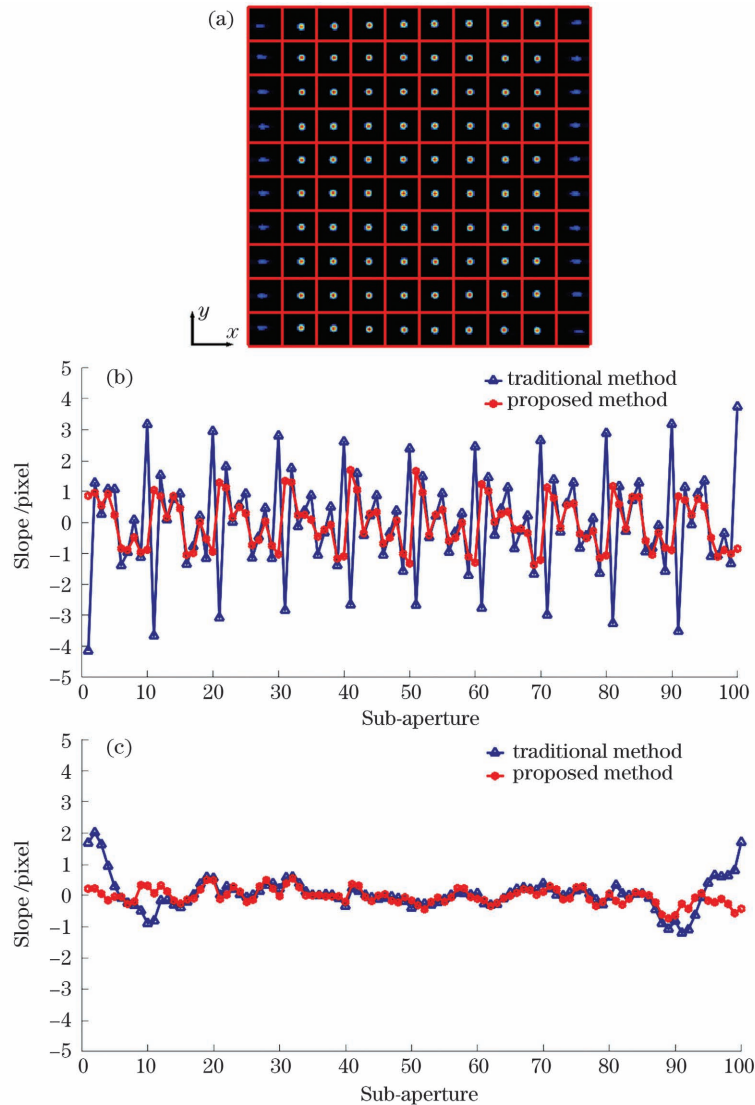


图 9 畸变波前在夏克-哈特曼波前传感器上的光斑阵列图及其在 x 方向和 y 方向的斜率分布。(a)畸变波前在夏克-哈特曼波前传感器中的光斑图;(b)畸变波前在 x 方向的斜率分布;(c)畸变波前在 y 方向的斜率分布

Fig. 9 Spot array diagram of distorted wavefront on Shaker-Hartmann wavefront sensor and slope distribution in x and y directions. (a) Spot array of distorted wavefront in Shack-Hartmann wavefront sensor; (b) slopes of distorted wavefront in the x direction; (c) slopes of distorted wavefront in the y direction

通过校正结果可以看出,由于变形镜校正能力不足,在对畸变波前进行补偿后,波前残差在边缘区域仍然有较大的相位梯度。使用直接斜率法校正

后,虽然波前 RMS 值以及 PV 值均有所下降,但是光束质量提升有限。通过寻优算法可以得到在变形镜校正不足条件下的最优校正效果,将优化算法得

到的波前残差作为波前传感器新的参考位置,使用自适应光学系统校正后,光束质量得到明显提升。

4 分析与讨论

从仿真结果可以看出,由于输入的畸变波前在边缘区域具有超过变形镜校正能力的相位梯度,因此无论使用何种波前复原算法都无法将该像差完全补偿掉。通常认为,波前残差 RMS 值越小,相应的光束质量越好,然而该结论成立的前提是波前残差 RMS 值小于 $1/10\lambda$ ^[6]。而本研究中校正后的波前残差 RMS 值均大于 $1/10\lambda$,仿真结果也验证了在校正后波前残差较大的情况下,波前斜率残差的 RMS 值越小,光束质量并不是越好。通过提出的校正方法,使得自适应光学系统的校正策略不再是校正后波前斜率残差平方和最小,而是以提升远场光束质量为目标。

需要注意的是,该方法虽然可以有效提升自适

应光学系统的校正效果,但是受限于波前传感器的离散采样以及其他误差,使得校正结果收敛于参考的最优校正结果而无法完全一致。此外,由于边缘区域的大梯度像差也包含一部分能量,对该区域无法完全校正会造成光束能量的损失。图 10 为标定光对应的远场光斑、使用传统标定的自适应光学系统校正后的远场光斑,以及使用本文提出的方法校正后的远场光斑的桶中功率值 (PIB) 曲线,横轴表示为 n 倍衍射极限 (DL)。通过 PIB 曲线可以看出使用本研究提出的方法后远场光斑的峰值以及光束质量都得到了有效改善,然而由于能量损失,其在目标区域的总功率小于标定光。因此所提方法适用于对光束质量和远场峰值强度要求比较高的情况,对于对波前信息完整度要求比较高的情况,则需要对自适应光学系统的结构进行优化以提升自适应光学系统的性能。

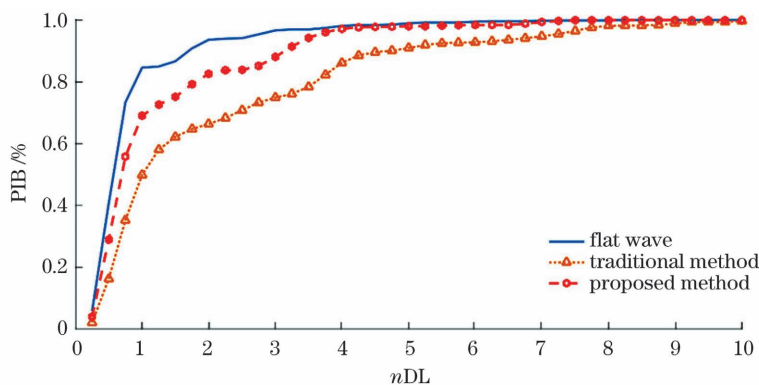


图 10 使用不同方法校正后远场光斑的 PIB 曲线

Fig. 10 PIB curve of the far-field spot after correction using different methods

5 结 论

针对输入波前具有超过变形镜校正能力的大相位梯度且使用传统标校方法校正后光束质量提升有限的问题,以提升远场光斑的光束质量为目标,提出了一种基于波前传感器标定优化的自适应光学校正方法。该方法根据输入波前畸变以及变形镜的校正能力,通过优化算法对波前传感器的标定位置进行优化,使变形镜的校正能力能够得到充分发挥并进一步提高光束质量。建立了板条激光器自适应光学校正系统模型,并对提出的方法进行仿真验证,当波前畸变存在自适应光学系统无法补偿的大相位梯度时,使用传统自适应光学系统校正后,光束质量由 $\beta=5.1$ 提升到 $\beta=3.7$,在使用所提出的方法后,光束质量进一步提升到 $\beta=2.0$ 。该方法有望用于板条固体激光器的光束净化系统中,以降低自适应光

学系统的复杂度和成本。

参 考 文 献

- [1] Eggleston J, Kane T, Kuhn K, et al. The slab geometry laser-Part I: theory [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(3): 289-301.
- [2] Injeyan H, Goodno G, Palese S. High power laser handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [3] Li M, Hu H, Tang C, et al. Edge distortion suppressing in Nd: YAG slab laser [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1214003.
李密, 胡浩, 唐淳, 等. Nd: YAG 板条激光器边缘畸变抑制 [J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1214003.
- [4] Yu X, Dong L Z, Lai B H, et al. Automatic low-order aberrations compensator for a conduction-cooled end-pumped solid-state zigzag slab laser [J]. Optics Communications, 2017, 402: 483-488.
- [5] Zhang R, Zhang X M, Su J Q, et al. Static phase

- control elements for inertial confinement fusion drivers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(3): 311-315.
- 张锐, 张小民, 粟敬钦, 等. 用于惯性约束聚变驱动器的静态相位控制元件[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 311-315.
- [6] Tyson R. Principles of adaptive optics[M]. Boston: CRC Press, 2010.
- [7] Ma S Q, Yang P, Lai B H, et al. Slab laser beam cleanup based on efficient stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805001.
- 马士青, 杨平, 赖柏衡, 等. 基于高效随机并行梯度下降算法的板条激光光束净化[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0805001.
- [8] Wu C S, Ko J, Davis C C. Lossy wavefront sensing and correction of distorted laser beams[J]. Applied Optics, 2020, 59(3): 817-824.
- [9] Li Q, Reinig M, Kamiyama D, et al. Woofer-tweeter adaptive optical structured illumination microscopy [J]. Photonics Research, 2017, 5(4): 329-334.
- [10] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, et al. 100 kW coherently combined slab MOPAs[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland. Washington, D. C.: OSA, 2009: 830-831.
- [11] Yu X, Dong L Z, Lai B H, et al. Adaptive aberration correction of a 5 J/6.6 ns/200 Hz solid-state Nd: YAG laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(14): 2730-2733.
- [12] Wang D, Du Y L, Wu Y C, et al. 20 kW class high-beam-quality CW laser amplifier chain based on a Yb: YAG slab at room temperature[J]. Optics Letters, 2018, 43(16): 3838-3841.
- [13] Guo Y, Peng Q, Bo Y, et al. 24.6 kW near diffraction limit quasi-continuous-wave Nd: YAG slab laser based on a stable-unstable hybrid cavity[J]. Optics Letters, 2020, 45(5): 1136-1139.
- [14] Jiang W H. Overview of adaptive optics development [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170489.
- 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489.
- [15] Wu C S, Ko J, Rzasa J R, et al. Phase and amplitude beam shaping with two deformable mirrors implementing input plane and Fourier plane phase modifications[J]. Applied Optics, 2018, 57(9): 2337-2345.
- [16] Chen S Q, Dong L Z, Chen X J, et al. Adaptive slab laser beam quality improvement using a weighted least-squares reconstruction algorithm [J]. Applied Optics, 2016, 55(11): 3077-3083.
- [17] Jiang W H, Li H G. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm [J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1271: 82-93.
- [18] Su C X, Dong L Z, Lai B H, et al. Adaptive beam clean-up of high power slab lasers using least-squares wavefront reconstruction algorithm with performance-based filtering[J]. Optics Communications, 2021, 490: 126886.
- [19] Tan Y, Yang P, Dong L Z, et al. Active beam cleanup of pulsed slab laser based on 59-unit adaptive optics system [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2017, 47(8): 084207.
- 谭毅, 杨平, 董理治, 等. 基于 59 单元自适应光学系统的脉冲板条固体激光光束净化研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(8): 084207.
- [20] Wang X, Lai B H, Dong L Z, et al. Intra-cavity aberration compensation in 100 W-order unstable ring slab lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801001.
- 王勋, 赖柏衡, 董理治, 等. 百瓦级环形非稳腔板条激光器腔内校正[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801001.
- [21] Yu J C, Tian B Y, Zhong Z Q, et al. Method for annular aberration correction of large-aperture thin-wall tube lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0905001.
- 余江川, 田博宇, 钟哲强, 等. 大遮拦比薄管激光环域像差校正方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0905001.
- [22] Xiang R J. Study on active control of beam quality in high-power solid-state slab laser system [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015.
- 向汝建. 高能固体板条激光器光束质量主动控制技术[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015.
- [23] Wei P, Li X Y, Luo X, et al. Influence of lack of light in partial subapertures on wavefront reconstruction for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0409002.
- 魏平, 李新阳, 罗曦, 等. 部分子孔径缺光对夏克-哈特曼波前传感器波前复原的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0409002.

Adaptive Optics Correction Method Based on Calibration Optimisation of Wavefront Sensor

Su Chunxuan^{1,2,3}, Dong Lizhi^{4*}, Fan Xinlong^{1,2}, Lai Boheng^{1,2,3*}, Ma Shiqing^{1,2,3},
Yang Ping^{1,2,3}, Xu Bing^{1,2,3}

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴Academy of Microelectronics Systems, CASIC Corporation, Chengdu, Sichuan 610213, China

Abstract

Objective The solid-state slab laser has become one of the most reliable, promising and potential lasers among current high-power lasers due to its small size, lightweight and high conversion efficiency. It is commonly used in various fields, including scientific research, industry and medical treatment. High output power and good beam quality are two constant goals in the development of high-power solid-state slab lasers. As laser output power increased, the edge effects became more severe and distorted the wavefront of the solid-state slab laser output beam, resulting in a non-linear drop in laser beam quality. Several methods are present to compensate for the distortions, including the use of static compensation components, non-linear optical compensation methods, and adaptive optics. Adaptive optics is a promising method to compensate for wavefront distortion in the laser output beam. The direct slope reconstruction method is commonly used in the research of solid-state slab laser beam clean-up, and the least-squares algorithm is used to solve the system's optimal solution.

Although adaptive optics can considerably improve the beam quality of laser output beams, some issues still need to be addressed. The least-squares reconstruction method's criteria are to minimise the sum of slope residual squares. The adaptive optics system's correction capability is limited by factors such as materials and cost. When the adaptive optics system can completely compensate for wavefront distortion, the least-squares reconstruction method can be used to obtain the system's optimal solution. However, if a portion of the distortions is beyond the capability of adaptive optics system, the wavefront distortions of the laser beam cannot be fully compensated and a considerable amount of wavefront residual is still present after compensation; the minimum sum of slope residuals squares is not equivalent to the best beam quality at this time. When the solid-state slab laser operates at high gain, the wavefront distortions are very likely to exceed the adaptive optics system's correction capability. Under these conditions, the least-squares reconstruction method cannot produce the optimal system solution.

Methods To solve the abovementioned problems, the most straightforward and effective method is to increase the number of actuators or even cascade multiple deformable mirrors with compatible wavefront sensors to improve an adaptive optics system's inherent correction capability. However, as the number of actuators in deformable mirrors increases, their size, weight and cost also increase. Another approach is to optimise the adaptive optics system's correction method, and a weighted least-squares reconstruction method has been proposed to improve the beam quality by assigning low weights to the uncorrectable wavefront components in the least-squares method. Unfortunately, determining the weights in a practical adaptive optics system is difficult. The edge effect remains a challenge, particularly when the number of actuators is limited because of the beam size or cost.

We proposed a novel adaptive optics correction method to further improve beam quality when wavefront distortions exceed the adaptive optics system's correction capability. In this method, we used the idea of optimal correction in the wavefront sensor-less adaptive optics system and combined it with the traditional adaptive optics system, with the improvement of beam quality as the optimisation goal, and the optimisation algorithm is used to optimise the calibration position of the wavefront sensor according to wavefront distortions and the correction capability of the deformable mirror, and it then uses the traditional adaptive optics system for aberration compensation.

Results and Discussions We used simulation to validate the proposed method. First, we combined the two-dimensional Legendre polynomials based on the characteristics of the solid-state slab laser's output wavefront to

obtain a wavefront with severe edge distortion, and the corresponding beam quality is $\beta = 5.1$ (Fig. 6). Then, the optimisation algorithm is used to find the best solution; the best beam quality that can be obtained after correction is $\beta = 1.8$ (Fig. 7). Finally, the proposed method and the traditional correct method are used to compensate for the distortions (Fig. 8). After correction using the traditional method, the beam quality improves to $\beta = 3.7$, whereas correction with the proposed method improves the beam quality to $\beta = 2.0$, which is closer to the optimal solution. Analysing the wavefront slope distribution using a different method reveals that after processing using the proposed method, the effect of uncorrectable large distortions on adaptive optics systems is reduced (Fig. 9).

Conclusions When the correction capability of the deformable mirror is limited, the correction results obtained using different methods show that, when compared with the traditional adaptive optics system without calibration optimization the method proposed in this paper can effectively improve the correction effect of the adaptive optics system.

Key words adaptive optics; aberration compensation; solid-state slab laser; calibration optimisation

OCIS codes 140.3580; 010.1080; 140.3300