

基于随机并行梯度下降方法的动态光束净化实验研究

王三宏 梁永辉 龙学军 于起峰

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 高能激光系统中通常包含光束净化装置以对激光器出射光束的波前畸变进行连续校正。为研究随机并行梯度下降自适应光学方法在光束净化问题上的可行性,按算法运行时序连续改变 37 单元变形镜的面形,以在实验光路中引入高能激光器输出光束的常见动态波前畸变,同时采用随机并行梯度下降算法控制同一变形镜对此动态畸变进行校正。实验结果显示,在事先消除系统初始像差的情况下,系统分别以 1 kHz 和 2 kHz 的模拟迭代速率工作时,激光束的动态像差都得到了充分抑制,光束质量在整个校正时段内始终维持在较好水平。这表明随机并行梯度下降自适应光学方法应用在光束净化系统中是可行的。

关键词 自适应光学; 光束净化; 随机并行梯度下降; 动态畸变; 变形镜

中图分类号 TP273.2 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092901.0097

Experimental Research of Laser Beam Cleanup for Dynamic Aberrations Based on Stochastic Parallel-Gradient-Descent Method

Wang Sanhong Liang Yonghui Long Xuejun Yu Qifeng

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract A beam cleanup subsystem is usually contained in high power laser system to correct for the wavefront aberrations of the output beam of the laser resonator continuously. To investigate the feasibility of the stochastic parallel gradient descent (SPGD) adaptive optics method on beam cleanup issue, dynamical wavefront aberrations, analogous to the commonly encountered wavefront distortions in high power laser beams, are first introduced into the experimental laser beam by continuously changing the surface shape of a 37-element deformable mirror incorporated in the system according to the iteration sequence of the SPGD algorithm, and then the same deformable mirror is used to correct for the produced aberrations by applying the SPGD algorithm to upgrade the control voltages of the mirror actuators. The experimental results show that, when the initial aberrations of the system being removed, the dynamic wavefront aberrations of the laser beam can be compensated successfully and the beam quality remains on a high level during the whole correction period with the system working on simulated iteration rates of 1 kHz and 2 kHz respectively. It is indicated that the SPGD adaptive optics method is feasible on beam cleanup system.

Key words adaptive optics; beam cleanup; stochastic parallel gradient descent; dynamic aberrations; deformable mirror

1 引言

在高能激光系统中,激光介质折射率分布的不均匀性、激光谐振腔的失调以及由于加工精度受限引起的谐振腔中各光学器件的面形误差,特别是光路上的各种介质吸收光能后的动态热变形等因素会导致激光器输出光束的波面发生畸变,从而大大降

低光束质量。因此,必须采取光束净化措施实时校正激光器出射光束的波前畸变以提高光束质量,这是自适应光学技术的重要应用之一。随机并行梯度下降(SPGD)最优化方法近年来在自适应光学领域得到了广泛研究^[1~4],推动了基于系统性能评价函数最优化的自适应光学系统的发展。这种自适应光

收稿日期: 2007-12-24; 收到修改稿日期: 2008-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(60708029)资助课题。

作者简介: 王三宏(1977—),男,博士生,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: sanhongwang@gmail.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,博士,教授,主要从事光测图像处理与自适应光学技术等方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

学系统采用最优化算法控制变形镜的驱动电压,使反映光学系统性能的某个(标量)评价函数最大化或最小化,从而达到实时消除系统中的各种波前像差,提高光束传输质量和光学系统成像质量的目的。该方法相较于基于波前测量的波前畸变校正方法具有结构紧凑、计算量小、便于向空间高分辨率扩展的优势,适合于在光束净化系统中应用。但传统的最优化方法收敛速度慢,限制了系统工作的实时性。SPGD算法的引入大大提高了系统的收敛速度,有望使这类系统达到实用。

在将 SPGD 自适应光学方法应用于激光光束的静态畸变校正实验^[5]和动态畸变校正数值模拟研究^[6]的基础上,本文继续对这一问题进行了动态畸变校正的实验研究。实验按 SPGD 算法的迭代速率连续改变变形镜的面形,以在光路中引入模拟的动态波前畸变,同时利用同一块变形镜对该畸变进行校正。实验结果表明:系统迭代速率越高,校正过程的收敛速度越快,收敛效果越好;如果事先消除系统的初始像差,则在 1 kHz 以上的模拟迭代速率下可以实现动态畸变的实时校正。此实验验证了该方法应用于实际光束净化系统的可行性。

2 实验方案

2.1 实验装置

实验系统结构示意图如图 1 所示。He-Ne 激光束经滤波、扩束后入射到 37 单元连续面形压电陶瓷变形镜上,变形镜受 PC 机输出电压控制产生相应的面形变化,从而在反射光束中引入波前畸变。受畸变光束再经透镜聚焦到远场,经显微物镜放大后成像在 CCD 上,PC 机根据聚焦光斑的光强分布计算系统性能评价函数。

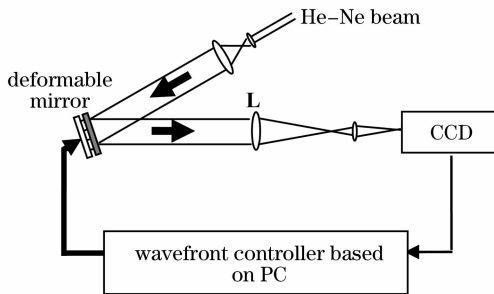


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

2.2 SPGD 波前控制方法

设系统性能评价函数 J 是施加在变形镜驱动器上的控制电压信号 \mathbf{u} 的函数,即 $J = J(\mathbf{u}) = J(u_1,$

$u_2, \dots, u_N)$,其中 N 是变形镜的驱动器个数,且当 J 取到最大值或最小值时,系统的像差最小。为使 J 达到极值,可采用梯度下降算法对控制电压进行循环迭代,算法中所需要的 J 的各梯度分量 $\{\partial J / \partial u_j\}$ 值通常是通过 J 的测量值进行估计。SPGD 算法通过对 \mathbf{u} 施加并行随机扰动,可以得到 J 的各梯度分量的随机估计,实现方法如下:每次迭代过程中,先对所有的控制电压信号同时施加相互统计独立的随机扰动 $\{\delta u_j\} (j=1, \dots, N)$,得到扰动之后的评价函数值 $J(u_1 + \delta u_1, \dots, u_j + \delta u_j, \dots, u_N + \delta u_N)$,再对控制电压施加反向扰动 $\{-\delta u_j\} (j=1, \dots, N)$,得到此时的函数值 $J(u_1 - \delta u_1, \dots, u_j - \delta u_j, \dots, u_N - \delta u_N)$,利用两次扰动引起的函数值的变化量

$$\delta J = J(u_1 + \delta u_1, \dots, u_j + \delta u_j, \dots, u_N + \delta u_N) - J(u_1 - \delta u_1, \dots, u_j - \delta u_j, \dots, u_N - \delta u_N),$$

得到各梯度分量的随机估计^[2] $\{\delta J \delta u_j\} (j=1, \dots, N)$,将其代入一般的梯度下降算法迭代公式就得到如下 SPGD 算法的基本迭代公式

$$u_j^{(n+1)} = u_j^{(n)} - \gamma \delta J^{(n)} \delta u_j^{(n)}, \quad j=1, \dots, N \quad (1)$$

其中 γ 为迭代增益系数, $\gamma > 0$ 对应于 J 的极小化, $\gamma < 0$ 对应于 J 的极大化;上标 n 表示迭代次数。

本文定义系统性能(光束质量)评价函数 J 为:

$$J = \sum_{m=1}^{1032} \sum_{n=1}^{778} I_{mn}^2 / \left(\sum_{m=1}^{1032} \sum_{n=1}^{778} I_{mn} \right)^2, \quad (2)$$

其中 I_{mn} 是 CCD 接收到的远场光斑图像上第 m 行第 n 列像素点上的光强灰度值。此评价函数反映了光斑的集中度^[7]:在总光强不变的情况下, J 值越大,说明光斑内的能量越集中。远场光斑的能量集中度反映了系统中像差的大小,当系统中像差被完全消除时,远场光斑变为衍射极限下的爱里斑。

2.3 动态波前畸变的引入

经滤波、扩束后的 He-Ne 激光束可认为是具有均匀振幅分布的平面波。由图 1 可以看出,通过 PC 机的输出电压控制变形镜面形产生变化,就可以在反射后的激光束中引入特定的波前相位分布。为了在实验中实现这一过程,需分以下三步进行:

- 1) 在计算机中按高能激光束的波前演化模型产生随时间变化的波前相位分布;
- 2) 将第一步中产生的波前相位序列转换成变形镜的驱动电压信号序列;
- 3) 按时序将驱动电压信号序列施加到变形镜上。

2.3.1 动态波前相位序列的产生

光波的波前相位可由泽尼克多项式的线性叠加表示,各阶多项式展开系数的大小决定了光波波前

的形态。本文首先在计算机中根据高能激光波前相位的演化模型模拟了激光束的 44 帧相位屏,每帧相位屏的表达式可写为:

$$\varphi_j(\rho, \theta) = \sum_{i=1}^{10} a_{j,i} \cdot Z_i(\rho, \theta), j = 1, \dots, 44 \quad (3)$$

其中 $\{Z_i(\rho, \theta)\} (i = 1, \dots, 10)$ 表示极坐标系下前 10

阶的泽尼克多项式, $\{a_{j,i}\}$ 表示第 j 帧第 i 阶泽尼克多项式的展开系数。每帧相位屏的产生速率按 25 frame/s 计算,则上述 44 frame 模拟数据记录了 1.72 s 时间内激光束的波前演化过程。图 2 给出了波前相位方差随时间的变化曲线以及第一帧和最后一帧的波前相位分布。

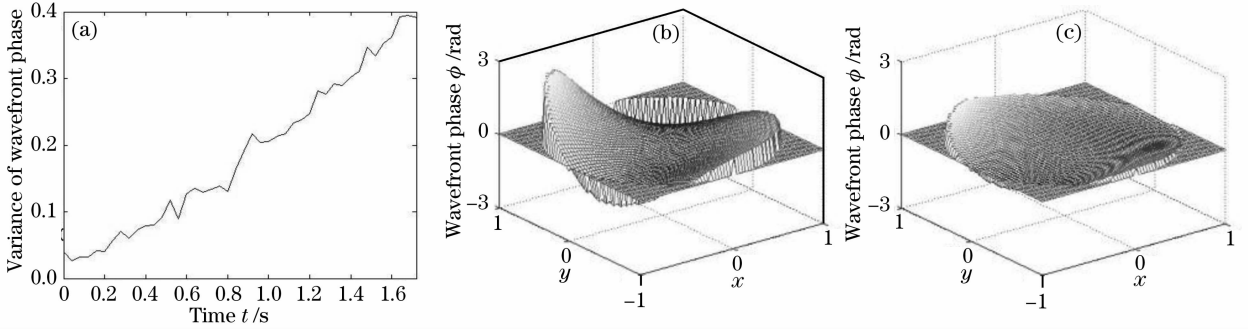


图 2 激光束的波前相位畸变演化过程。波前相位方差随时间的变化曲线(a);起始时刻(b)和终止时刻(c)的波前相位分布

Fig. 2 Evolution of the wavefront phase distortions of the laser beam. (a) Variance evolution of the wavefront phase distortions versus time; wavefront phase distribution at the initial time (b) and the end time (c)

2.3.2 波前相位序列到驱动电压信号序列的转换

为了通过变形镜加载所需要引入的第 j 帧波前相位分布,需令此时刻变形镜的驱动电压满足 M 取最小值的优化条件^[8]:

$$M = \frac{1}{\pi} \iint \left[\sum_{k=1}^{37} S_k(x, y) u_{j,k} - \sum_{i=1}^{10} a_{j,i} Z_i(x, y) \right]^2 dx dy, \quad (4)$$

其中 $\{S_k(x, y)\}$ 表示笛卡尔坐标系下变形镜第 k 个驱动器的影响函数, $\{u_{j,k}\}$ 对应第 j 帧相位分布应加在第 k 个驱动器上的控制电压, $\{Z_i(x, y)\} (i = 1, \dots, 10)$ 表示笛卡尔坐标系下的泽尼克多项式。为了求解最优驱动电压,令(4)式左边的各阶偏导数为零:

$$\frac{\partial M}{\partial u_{j,l}} = \frac{2}{\pi} \iint \left[\sum_{k=1}^{37} S_k(x, y) u_{j,k} - \sum_{i=1}^{10} a_{j,i} Z_i(x, y) \right] S_l(x, y) dx dy = 0, \quad (5)$$

定义

$$G_{k,l} = \frac{1}{\pi} \iint S_k(x, y) S_l(x, y) dx dy,$$

$$B_{i,l} = \frac{1}{\pi} \iint Z_i(x, y) S_l(x, y) dx dy,$$

则上式可写为如下的矩阵形式:

$$\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{u}_j = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{a}_j, \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,37} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \cdots & G_{2,37} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{37,1} & G_{37,2} & \cdots & G_{37,37} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} & \cdots & B_{1,37} \\ B_{2,1} & B_{2,2} & \cdots & B_{2,37} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{10,1} & B_{10,2} & \cdots & B_{10,37} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{u}_j = \begin{bmatrix} u_{j,1} \\ u_{j,2} \\ \vdots \\ u_{j,37} \end{bmatrix}, \mathbf{a}_j = \begin{bmatrix} a_{j,1} \\ a_{j,2} \\ \vdots \\ a_{j,10} \end{bmatrix}. \text{ 由(6)式得到最优驱动}$$

电压的表示式为:

$$\mathbf{u}_j = (\mathbf{G}^T)^{-1} \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{a}_j. \quad (7)$$

若变形镜各驱动器的影响函数已知,则矩阵 \mathbf{G} 和 \mathbf{B} 就可由事先计算得到,再根据拟产生像差的泽尼克多项式系数 $\{a_{j,i}\} (i = 1, \dots, 10)$ 就可进一步计算得到为模拟第 j 帧相位屏需要对变形镜施加的驱动电压信号。

2.3.3 驱动电压信号序列的施加时序

为了模拟连续校正按第 2.3.1 节所产生的 44 帧波前相位分布序列演化的高能激光束动态波前畸变的情况,本文采用按 SPGD 算法的迭代时序,在

每一迭代循环之前引入当前时刻对应的波前相位畸变的思路。当拟模拟的算法迭代速率大于 25 Hz (原始 44 帧相位采样的产生速率) 时, 可通过在相邻两帧波前相位分布的泽尼克多项式展开系数 $\{a_{j,i}\}$ 和 $\{a_{j+1,i}\}$ ($i=1, \dots, 10$) 之间线性插值得到相应时刻的波前相位分布的泽尼克多项式展开系数 $\{a_{j',i}\}$ ($i=1, \dots, 10$), 其中 j' 对应于每一循环的开始时刻。对于一个变形镜既用于波前畸变的引入又用于波前畸变校正的情况, 每一个新的循环迭代开始之前, 通过将当前帧与前一帧波前相位分布对应的驱动电压信号之差叠加到变形镜上来引入波前畸变。按算法的迭代速率施加波前畸变, 可以使系统模拟的工作速率不受实际系统响应时间的限制。

3 实验结果及分析

实验使用的变形镜为中科院成都光电技术研究所研制的 37 单元反射式连续面形压电陶瓷变形镜, 口径为 100 mm, 响应时间为 1 ms。远场光斑测量采用的是德国 AVT 公司的 GUPPY F080B CCD 像机, 像机分辨率为 1032×778 , 工作帧频约为 12.5 Hz, 实验中采用单帧曝光的工作模式。由于 SPGD 算法

完成一个迭代循环需要 CCD 相机和变形镜顺序执行三次动作, 因此系统实际工作的迭代速率为 4 Hz 左右。各控制通道随机扰动电压的统计特性满足伯努利分布, 电压扰动幅度均为 0.02 V (相当于光路中 0.02 个波长的光程改变)。算法的迭代增益系数 γ 采用 $\gamma = \gamma_0 / (c + J)$ 的自适应变化形式, 其中 $\gamma_0 = -50, c = 0.00001$ 。

本文首先在模拟迭代速率分别为 1 kHz 与 2 kHz 时进行了对比实验, 系统一开始工作就引入波前畸变。10 次实验的平均结果在图 3 中给出, 其中图 3(a) 和图 3(c) 给出的是 J 的平均值随时间的变化曲线, 图 3(b) 和图 3(d) 是 J 的归一化标准偏差

$$\sigma_J(t) = \frac{\langle [J(t) - \langle J(t) \rangle]^2 \rangle^{1/2}}{\langle J(t) \rangle}$$

随时间的变化曲线, 式中 $\langle \cdot \rangle$ 为对 10 次实验结果求平均。图 3(a) 和图 3(b) 对应于迭代速率为 1 kHz, 图 3(c) 和图 3(d) 对应于迭代速率为 2 kHz。图 3(a) 和图 3(c) 中的虚线指示了 J 值从初态优化到稳定态时所对应的收敛时间点 (相应于改进量的 80% 处), 底部的左右两幅灰度图分别对应于某次光束净化过程中初始时刻与终止时刻测量得到的远场光斑图。

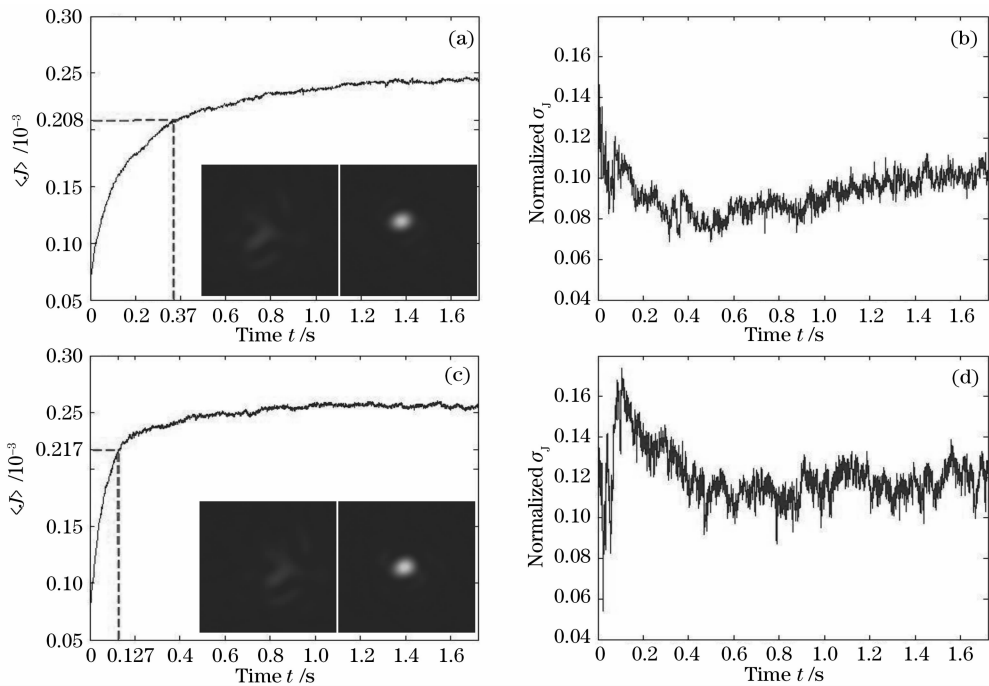


图 3 不同模拟迭代速率下的校正结果

Fig. 3 Results of correction trials at different simulation iteration rates

由图 3(a) 和图 3(c) 可以看出, 在 1 kHz 和 2 kHz 的模拟迭代速率下, 分别经过不同的收敛时间后 J 值都能从初始较低的水平提升并稳定到一个较高水平, 这说明在系统工作的后半部分时间里, 光

束的动态像差得到了较好的抑制, 而且无论是从收敛状态还是收敛速度上看, 2 kHz 模拟迭代速率下系统的校正特性要优于 1 kHz 的情况。

不过, 图 3(a) 和图 3(c) 中 J 的初始值远小于理

论值,这是由于实验系统存在固有像差所致。为排除系统像差的影响,随后的实验先利用 500 次迭代循环校正系统的初始像差,然后再对系统施加动态像差。10 次实验的平均结果在图 4 中给出,图 4 中的虚线按时序将图分成两部分,左侧是对系统静态像差进行校正的时间段,右侧为引入动态波前畸变的时间段。图 4(a)和图 4(c)给出了 J 的平均值随时间的变化曲线,图 4(a)中 $\langle J_c \rangle$ 和 J_{nc} 分别指示对动态波前畸变施加校正时 J 值平均收敛曲线和未施加校正时 J 值随

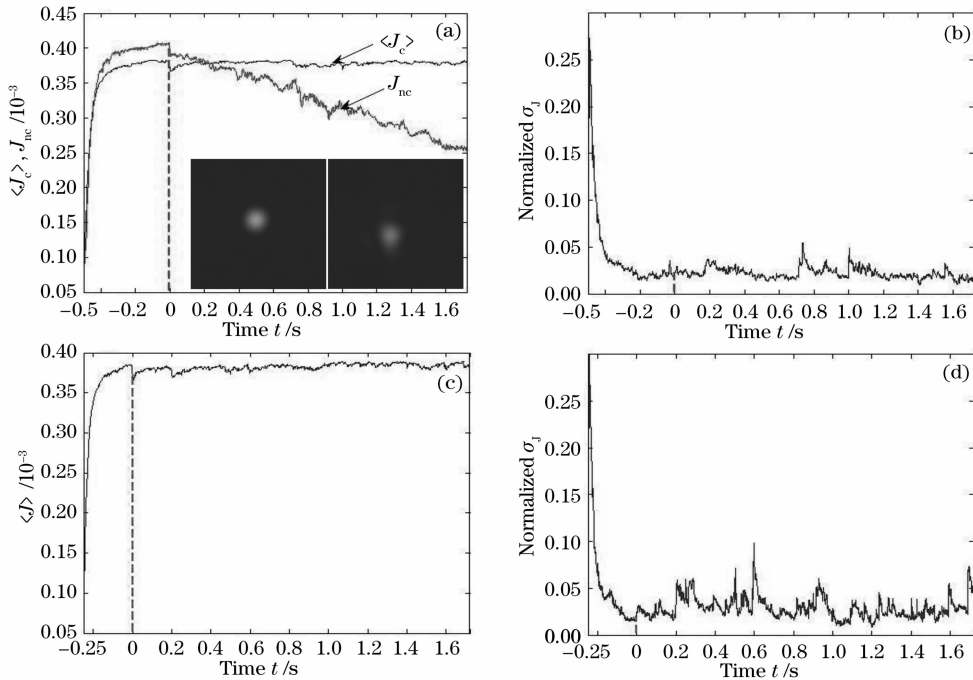


图 4 系统初始像差被校正后,不同模拟迭代速率下的校正结果

Fig. 4 Results of correction trials at different simulation iteration rates, with the system's initial aberrations corrected

4 结 论

本文针对高能激光束常见的动态波前相位畸变,模拟了采用随机并行梯度下降自适应光学方法对光束进行实时净化的实验。实验结果表明,系统迭代速率越高,动态波前畸变校正效果越好。在事先完全消除系统静态像差后,以 1 kHz 与 2 kHz 的迭代速率对激光束的实时净化效果非常显著,动态波前畸变都得到了有效抑制,光束质量始终能够维持在很好的状态。本文的工作验证了随机并行梯度下降自适应光学方法用于光束净化的可行性,为该技术在实际光束净化系统中的实际应用奠定了基础。

参 考 文 献

1 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, J. C. Ricklin. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 907~909

时间的变化曲线,左、右插图分别是 0 s 时刻和 1.72 s 时刻未施加校正时的远场光斑图,图 4(b)和图 4(d)是 J 的归一化标准偏差随时间的变化曲线。图 4(a)和图 4(b)对应 1 kHz 的模拟迭代速率,图 4(c)和图 4(d)对应 2 kHz 的模拟迭代速率。

由图 4 可以看出,在系统初始像差被消除后,在 1 kHz 和 2 kHz 模拟迭代速率的校正下,激光束的动态波前畸变能够在整个校正时段被充分抑制,光束质量始终都稳定在很好的状态。

2 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(10): 2745~2758

3 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, M. Cohen *et al.*. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(8): 1440~1453

4 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, T. G. Bifano *et al.*. Microscale adaptive optics: wavefront control with a μ -mirror array and a VLSI stochastic gradient descent controller [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4243~4253

5 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Experimental explorations of the laser beam cleanup system based on stochastic parallel-gradient-descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 613~618

梁永辉,王三宏,龙学军等. 随机并行梯度下降光束净化实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 613~618

6 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Beam cleanup technique based on stochastic parallel gradient descent wavefront control method[C]. *SPIE*, 2007, **6831**:

7 R. A. Muller, A. Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(9): 1200~1210

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