

高能固体脉冲激光热晕效应相位补偿的数值分析

冯晓星,张鹏飞,乔春红,张京会,范承玉,王英俭

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室,安徽 合肥 230031)

摘要: 热晕效应是高能激光大气传输最重要的非线性效应之一。利用激光大气传输四维仿真程序,针对高能固体脉冲激光大气传输的非线性热晕效应,采用常规自适应光学系统与随机并行梯度算法自适应光学系统对其相位补偿进行了数值模拟和分析。结果表明:当脉冲宽度 1 ms,重复频率 10 Hz,单脉冲发射功率 500 kW 时,常规自适应光学系统补偿效果较好;当脉冲发射功率增加或者重复频率增加时,随机并行梯度下降算法自适应光学系统补偿效果较好。

关键词: 大气传输; 热晕效应; 自适应光学; 随机并行梯度下降(SPGD)算法

中图分类号: TN241 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1408-06

Numerical analysis of thermal blooming effect and phase compensation of adaptive optics about high energy solid pulse laser

Feng Xiaoxing, Zhang Pengfei, Qiao Chunhong, Zhang Jinghui, Fan Chengyu, Wang Yingjian

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Thermal blooming is one of the most important nonlinear effects on high energy laser propagation in the atmosphere. By using the four-dimensional codes, adaptive optics systems based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) optimization were proposed for compensating thermal blooming of high energy solid pulse laser, and the compensation effects compared with the conventional adaptive optical system. The results show that when the repetition frequency equal to 10 Hz, the pulse peak power is 500 kW, the conventional adaptive optical system is better for compensation. But when the repetition frequency of increases or the pulse peak power is increased, SPGD adaptive optical system is better than conventional adaptive optical system.

Key words: atmospheric propagation; thermal blooming effects; adaptive optics; stochastic parallel gradient descent algorithm

收稿日期:2014-09-13; 修订日期:2014-10-15

基金项目:国家 973 计划;中国科学院合肥物质科学研究院计算中心资助项目

作者简介:冯晓星(1980-),男,博士生,主要从事激光大气传输的物理及实验研究。Email:fengxiaoxing81@163.com

导师简介:王英俭(1963-),男,研究员,博士生导师,主要从事激光大气传输及其自适应光学相位校正研究。Email:wyl@aiofm.ac.cn

范承玉(1965-),男,研究员,博士生导师,主要从事激光大气传输及其自适应光学校正理论和数值模拟研究工作。

Email:cyfan@aiofm.ac.cn

0 引言

高能激光在大气中传输时, 大气与激光相互作用将产生一系列的线性效应与非线性效应。在这一系列效应中, 非线性热晕效应将会导致激光光束质量的严重退化, 并限制了激光到达目标上的最大激光功率密度, 从而对高能激光的工程应用产生不利的影响^[1-3]。理论与实验均表明利用自适应光学系统可以对热晕效应进行部分相位校正, 改善光束质量^[4-6]。

关于脉冲激光大气传输热晕效应研究, 国外早在 20 世纪 70 年代就已经开始了。例如 Buser 对长脉冲热晕效应的实验研究, Wallace 对低重频短脉冲热晕效应补偿的研究等。国内也有不少报道, 近年来廖天河等对序列脉冲激光在不同大气模型下的非线性热晕效应机制进行了研究等^[7-10]。但是目前国内外关于长脉冲激光传输相位补偿研究很少, 尤其是国内目前还没见到公开报道。此文的研究工作主要针对长脉冲激光热晕效应相位补偿。笔者在已有的四维数值仿真程序的基础上^[6]进行了改进, 增加了适用于高能固体脉冲激光大气传输效应的计算模块。在此基础上, 结合新型无波前探测自适应光学系统即随机并行梯度自适应光学系统^[11-13], 对高能固体脉冲激光大气传输热晕效应进行相位补偿研究, 并与常规自适应光学系统校正效果进行对比分析。

1 高能固体脉冲激光大气传输热晕效应的数值仿真模型

对于激光大气传输来讲无论是连续激光还是脉冲激光, 它们的光波传输方程都是一样的, 主要差别来自于折射率扰动方程即激光与大气的热相互作用方程。在连续或准连续激光大气传输时, 一般情况下大气吸收激光能量产生的温度变化很小, 大气加热过程可近似为等压过程 (忽略气体压力变化导致的声波的作用), 激光与大气相互作用方程可以表示为^[6]:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla_{\perp}\right)n_b - \eta \nabla_{\perp}^2 n_b = -\Gamma \alpha I(r, z) \quad (1)$$

式中: n_b 为激光加热大气引起的折射率扰动; α 为大

气吸收系数; \vec{V} 为平均风速; η 为热传导系数。对于高能固体长脉冲激光大气传输非线性热晕效应而言, 脉冲宽度大于声速渡越时间, 满足等压近似条件, 即单脉冲热晕相位屏求解(1)式即可。而对于序列长脉冲高功率激光大气传输而言, 第 n 个脉冲不仅受其本身的影响, 同时还可能受到前一系列激光脉冲的影响。而且在序列脉冲较长时, 还要考虑风速的影响。因此, 第 n 个激光脉冲时的密度扰动可以表示为:

$$\rho_1(x, y, n \Delta t) = \rho_1^{np}(x - v \Delta t, y, (n-1) \Delta t) + \rho_1^p \quad (2)$$

$$n_1 = (n_0 - 1) \rho_1 / \rho_0 \quad (3)$$

式中: 第一项表示前 $n-1$ 个脉冲对传输路径密度变化的影响; ρ_1^p 为单脉冲自诱导热畸变导致的密度变化量; n_0 、 ρ_0 为周围环境大气的折射率和密度, 程序流程如图 1 所示。

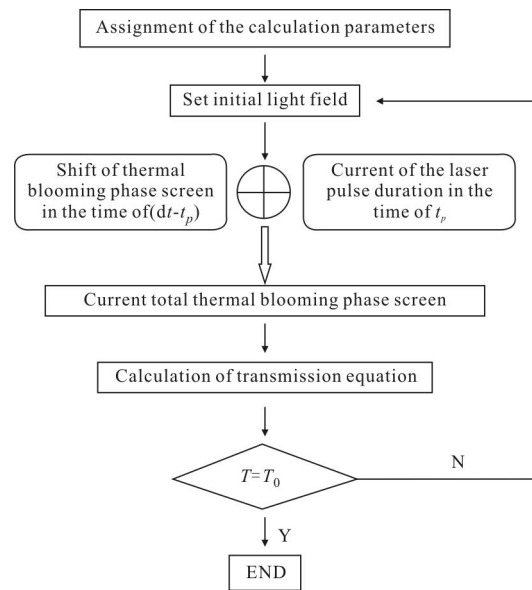


图 1 程序流程图

Fig.1 Flow chart of program

图 2 给出了单脉冲不同功率下, 3 km 位置处轴上 Strehl 比与峰值 Strehl 比随脉冲功率的变化关系。从图中可以看出, 仿真结果与理论计算结果基本一致。当功率较高时有些差别, 这是由于理论计算是在几何光学及线性近似下得到的, 适用于较弱强度的热晕效应。因此此文数值仿真方法在中弱热晕条件计算结果较为可靠, 能够很好地反应热晕效应对序列脉冲激光大气传输的影响。

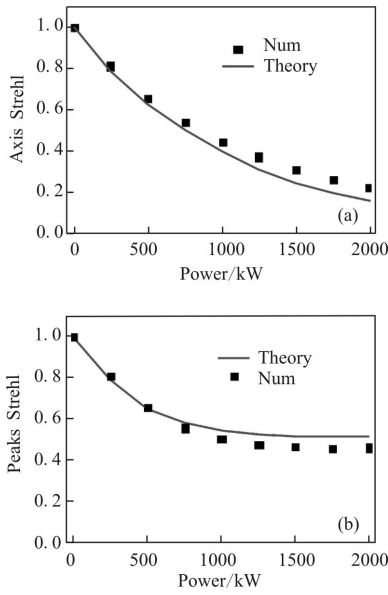


图 2 Strehl 比随脉冲功率变化关系
Fig.2 Strehl ratio vs pulse power

2 自适应光学系统仿真模型

2.1 常规自适应光学系统

此文采用 61 单元自适应光学系统,其子孔径与驱动器排布对应关系如图 3 所示。

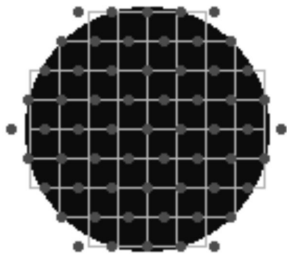


图 3 61 单元自适应光学系统
Fig.3 Configuration of 61-element AO system

对于变形镜的影响函数 $R(x,y)$,可采用实际系统的测量结果,也可采用拟合函数形式。综合大量的实验和理论研究结果表明,高斯型影响函数能较好地描述分立驱动连续表面变形镜的影响函数,即

$$R_n(x,y)=\exp\left\{\ln p \frac{[x-x_c(n)]^2+[y-y_c(n)]^2}{r_d^2}\right\} \quad (4)$$

式中: $x_c(n), y_c(n)$ 表示第 n 个驱动器位置坐标; r_d 为驱动器的平均间距; p 为耦合系数,即文中驱动器单位驱动量的情况下相邻驱动器的位移量。在不同的影响函数、耦合系数以及不同的驱动器排列方式情

况下,复原波前的结果将会有所不同。

2.2 SPGD 自适应光学系统^[13]

SPGD 算法是一种特殊的梯度下降算法,它利用控制参数的变化量 u 与系统性能指标测量值的变化量 J 进行控制参数的梯度估计,并且在进行梯度估计时采用了并行扰动技术,从而使梯度估计的运算时间独立于控制变量的维数,大大提高搜索最优值的速度。

在自适应光学系统中,残余相位 $\phi(\vec{r})=\varphi(\vec{r})+u(\vec{r})$,其中 $\varphi(\vec{r})$ 为畸变波前, $u(\vec{r})$ 为波前校正器引入的相位, $\vec{r}=(x,y)$ 为与光轴垂直的平面内的位置矢量。选取系统的性能指标 $J=J[\phi(\vec{r})]=J[u(\vec{r})]$ 。 $u(\vec{r})$ 为控制参量, $u=\{u_1,u_2,\dots,u_n\}$ 。SPGD 算法的实现过程如下:随机生成扰动向量 $\delta u^{(n)}=\{\delta u_1,\delta u_2,\dots,\delta u_N\}^{(n)}$,其分布满足伯努利分布。性能指标的变化量为:

$$\delta J^{(n)}=\delta J_+^{(n)}-\delta J_-^{(n)} \quad (5)$$

式中: $\delta J_+^{(n)}=J(u^{(n)}+\delta u^{(n)})-J(u^{(n)})$; $\delta J_-^{(n)}=J(u^{(n)}-\delta u^{(n)})-J(u^{(n)})$ 。那么梯度估计为 $\gamma \delta J^{(n)} \delta u^{(n)}$, γ 为增益参数,利用梯度下降进行迭代:

$$u^{(n+1)}=u^{(n)}+\gamma \delta J^{(n)} \delta u^{(n)} \quad (6)$$

在实际应用中,目标函数向极大化方向优化,取正值;反之,取负值。迭代的过程就是在一定的迭代步数内,在控制参量空间寻找最优的电压向量 $u(\vec{r})$,使得残余波前 $\phi(\vec{r})$ 最小,系统则达到最优。该系统中的控制参量为变形镜引入的相位 $u(r)$,可表示为如下形式:

$$u(r)=\sum_{j=1}^N u_j R_j(r) \quad (7)$$

式中: N 为变形镜驱动器数,仿真中 $N=61$; u_j 为控制信号,即第 j 个驱动器所加电压值; $R_j(r)$ 为第 j 个驱动器的影响函数,为高斯型影响函数,驱动器排布形式如图 3 所示。

3 高能固体序列脉冲激光大气传输热晕效应补偿分析

仿真中自适应光学系统参数:信标光为合作信标,采用 61 单元自适应光学系统,不考虑自适应光学系统带宽,驱动器间距 $r_d=0.0625$,为无量纲归一化间距。基于 SPGD 算法,自适应光学系统评价指标

为最小二阶距半径。

大气参数及发射系统参数: 大气吸收系数和散射系数分别为 $0.001\ 98\ \text{km}^{-1}$ 、 $0.006\ 79\ \text{km}^{-1}$, 声速为 $340\ \text{m/s}$, 主激光波长和信标光波长都采用 $1.06\ \mu\text{m}$, 发射口径 D 为 $0.36\ \text{m}$, 平台光束, 聚焦传输 $7\ \text{km}$, 脉宽 $1\ \text{ms}$, 传输路径风速为 $2\ \text{m/s}$ 。脉冲重复频率 f_p 为 10 、 30 、 $50\ \text{Hz}$, 激光的发射功率 P_t 分别取 $500\ \text{kW}$ 、 $2\ 000\ \text{kW}$ 。

3.1 不同发射功率条件下校正效果的分析

固体脉冲激光重复频率 $10\ \text{Hz}$, 脉冲发射功率分别取 $500\ \text{kW}$ 和 $2\ 000\ \text{kW}$ 。从图 4 中可以看出, 当功率为 $500\ \text{kW}$ 时, 常规自适应光学系统对高能固体脉冲激光相位补偿后, 光斑峰值有明显提高; 而使用 SPGD 自适应光学系统补偿后, 峰值和光斑形状并没有显著变化。当脉冲发射功率增大到 $2\ 000\ \text{kW}$ 时, 热晕效应变严重, 可以看出, 两种相位补偿方法峰值光强都提高, 并且 SPGD 校正后, 峰值 Strehl 比明显优于常规自适应光学系统校正效果。

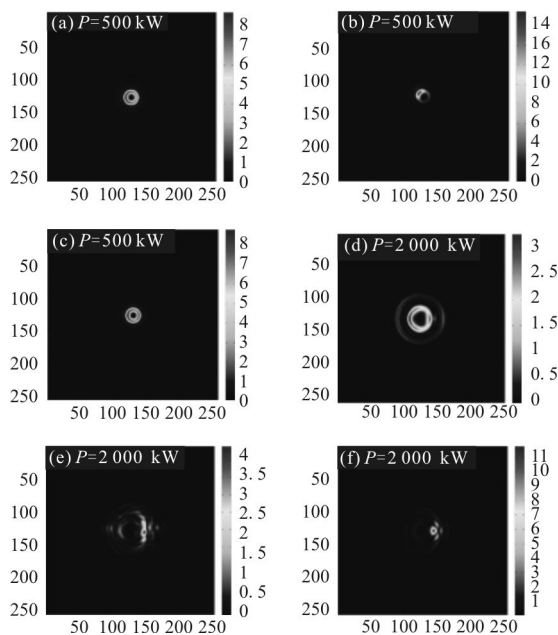


图 4 高能脉冲激光传输至目标位置处光斑形态, (a)和(d)为开环, (b)和(e)为常规 AO 闭环, (c)和(f)为闭环 SPGD 系统

Fig.4 Spot pattern at the target of the high energy laser atmospheric propagation: (a) (d) Open loop; (b) (e) Conventional closed loop AO; (c) (e) Closed loop SPGD

表 1 为不同发射功率下, 一倍衍射极限半径环围 Strehl 比较校正前后的变化。从表 1 可以看出, 当发射功

率 $500\ \text{kW}$ 时, 常规自适应光学系统校正较好, SPGD 自适应光学系统校正效果不明显; 当发射功率增加到 $2\ 000\ \text{kW}$ 时, SPGD 自适应光学系统补偿后 Strehl 比增到 0.289 , 明显优于常规自适应光学系统校正。

表 1 不同发射功率下, 一倍衍射极限半径内环围 Strehl 比

Tab.1 Encircle Strehl ratio of one time diffraction limit radius at different transmit power

Peak power/kW	Open loop	Closed loop AO	Closed loop SPGD
500	0.268	0.473	0.270
2 000	0.105	0.129	0.289

图 5 给出了校正前后 63.2% 环围能量随光斑扩展的变化。从图中可以看出, 当脉冲发射功率 $500\ \text{kW}$ 时, 常规自适应光学系统进行相位补偿, 能量集中度在 1 倍和 2 倍衍射极限内都有较大提升, 但使用 SPGD 算法的自适应光学系统, 对光斑能量集中度没有明显改变。当发射功率 $2\ 000\ \text{kW}$ 时, 两种补偿方式能量集中度都增加, 而且 SPGD 算法自适应光学系统补偿效果较好。

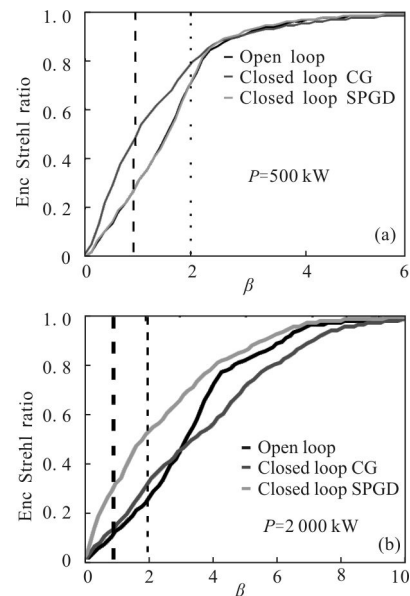


图 5 高能固体脉冲激光传输至目标位置处, 光斑环围 Strehl 比与光斑扩展倍数的关系

Fig. 5 Encircle Strehl ratio at the target of the high-energy laser atmospheric propagation

3.2 不同重复频率下校正效果的分析

脉冲发射功率为 500kW,重复频率分别为 30 Hz 和 50 Hz,图 6 给出了两种不同重复频率下脉冲激光经热晕大气传输至目标位置处光强分布。与重复频率为 10 Hz 时相比,重复频率高时开环条件下已出现较明显的重叠热晕效应,光斑呈月牙状。闭环条件下,使用常规自适应光学系统和 SPGD 系统补偿后,两种自适应光学系统校正都有明显效果,并且 SPGD 算法补偿效果更加明显。表 2 为不同重复频率下,1 倍衍射极限半径内环围 Strehl 比较校正前后的变化。同样可以得到,当频率增加时,SPGD 系统补偿效果比常规自适应光学系统更具有优势。

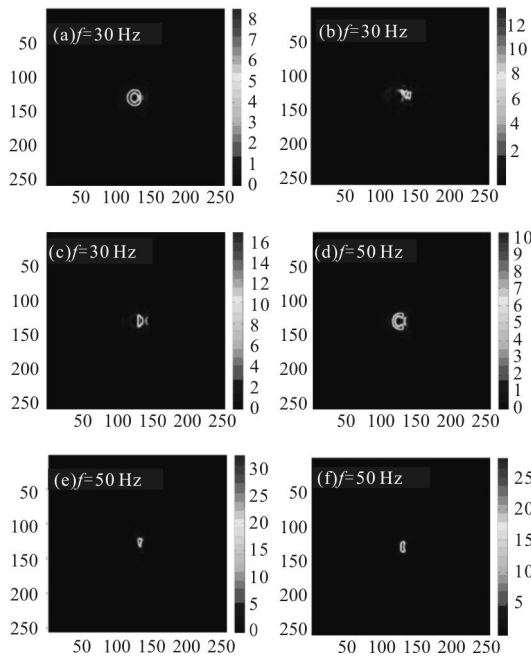


图6 高能脉冲激光传输至目标位置处光斑形态:(a)和(d)为开环,(b)和(e)为常规 AO 闭环,(c)和(f)为 SPGD 系统闭环
Fig.6 Spot pattern at the target of the high energy laser propagation through the thermal blooming atmosphere:(a)(d) Open;(b)(e)Conventional closed loop AO;(c)(f) Closed loop SPGD

图 7 给出了校正前后环围能量随光斑扩展的变化。校正后,重复频率 30 Hz 时,SPGD 校正效果在 1 倍和 2 倍衍射极限半径内能量集中度比常规自适应光学校正效果好;当重复频率为 50 Hz 时,两种自适应光学系统校正都具有校正效果,SPGD 在 2 倍衍射极限半径内校正效果要比常规效果好。

表 2 不同重复频率下,1 倍衍射极限半径内环围 Strehl 比

Tab.2 Encircle Strehl ratio of one time diffraction limit radius power at different repetition frequenc+

Repetition frequency/Hz	Open loop	Closed loop AO	Closed loop SPGD
10	0.268	0.473	0.270
30	0.256	0.421	0.540
50	0.248	0.616	0.634

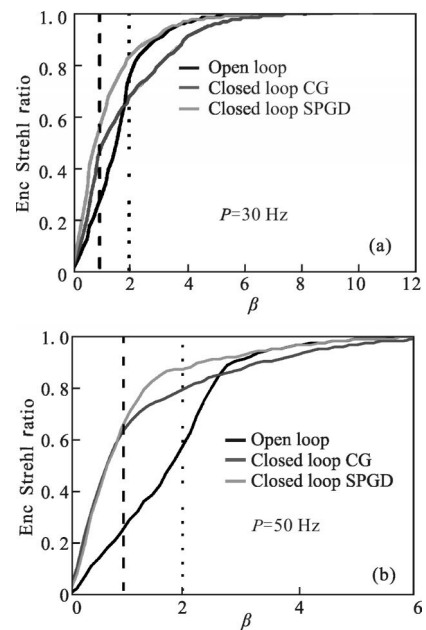


图 7 高能固体脉冲激光传输至目标位置处,光斑环围 Strehl 比与光斑扩展倍数的关系

Fig. 7 Encircle Strehl ratio at the target of the high energy laser atmospheric propagation

4 结论

文中针对高能固体激光,建立了长脉冲激光大气传输热晕效应及其自适应光学系统相位补偿的物理模型。改进后的四维程序不仅满足连续高能激光,同时也可以仿真长脉冲激光的热晕效应。利用建立的模型,对高能固体脉冲激光热晕效应常规自适应光学系统和 SPGD 自适应光学系统相位补偿进行了初步数值模拟分析。结果表明,脉宽为 1 ms 脉冲激光在一定条件下,当热晕效应较弱时,常规自适应光学系统校正效果较好;当热晕效应较强时,SPGD 系

统补偿效果要比常规自适应光学系统更有优势。这能为自适应光学系统优化设计和工程应用提供参考依据。

参考文献:

- [1] Smith D C. High-power laser propagation [J]. *Proc IEEE*, 1977, 65(12): 1679-1714.
- [2] Gebhardt F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview [C]//SPIE, 1990,1221: 2-25.
- [3] Rao ruizhong. Combined effect of turbulence and thermal blooming of laser propagation in atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 130-134.(in Chinese)
饶瑞中. 激光大气传输湍流与热晕综合效应[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 130-134.
- [4] Karr T J. Thermal blooming compensation instabilities [J]. *J Opt Soc Am A*, 1989, 6(7): 1038-1048.
- [5] Wang Yingjian, Wu Yi, Gong Zhiben. Adaptive Optics Phase Compensation for nonlinear thermal blooming [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(10): 1418-1422. (in Chinese)
王英俭, 吴毅, 龚知本. 非线性热晕效应自适应光学位相补偿[J]. 光学学报, 1995, 15(10): 1418-1422.
- [6] Wang Yingjian. Some study on the laser propagation in the atmosphere and its phase compensation [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1996. (in Chinese)
王英俭. 激光大气传输及其相位补偿的若干问题讨论[D]. 合肥:中国科学院安徽光学精密机械研究所, 1996.
- [7] Buser R G, Rohde R S. Transient thermal blooming of long laser pulses[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(1): 51-55.
- [8] Sun Zhongtao, Sun Xiaoquan, Zou Jiwei. Numerical analysis of thermal blooming induced by pulsed laser propagation in atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 189-193. (in Chinese)
孙中涛, 孙晓泉, 邹继伟. 脉冲激光大气传输热晕数值分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 189-193.
- [9] Liao Tianhe, Liu Wei, Gao Qiong. Thermal blooming of repetitively pulsed propagation in different atmospheric models[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 799-803. (in Chinese)
廖天河, 刘伟, 高穹. 序列脉冲激光在不同大气模式下的热晕效应研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 799-803.
- [10] Wu Wuming, Wu Huiyun, Zhu Jiajian, et al. Numerical analysis of thermal blooming in the atmosphere for high-energy solid-state heat capacity lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 445-504. (in Chinese)
吴武明, 吴慧云, 朱家健, 等. 高能固体热容激光器大气热晕效应数值分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 445-504.
- [11] Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive optics based in analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17(8): 1440-1453.
- [12] 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. (in Chinese)
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.
- [13] Ma Huimin, Zhang Pengfei, Zhang Jinghui, et al. Stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(6): 1206-1211. (in Chinese)
马慧敏, 张鹏飞, 张京会, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降算法[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(6): 1206-1211.