

文章编号: 0258-7025(2009)11-2920-04

# 腔镜位置变形镜波前补偿与实验研究

代万俊 胡东霞 周 维 赵军普 张 鑫 张 崑 蒋学君 邓 武 黄小军 朱启华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 在多程放大系统中,激光一般要经过腔反射镜两次,将变形镜置于腔反射镜位置能够有效提高其校正量。在某些多程放大系统设计过程中,为了降低输出端激光的像差,采用了 $90^\circ$ 旋转的“U”型反转器和变口径技术,激光两次经过腔反射镜的位置和坐标关系都发生了变化。采用数学的方法对这种情况下腔反射镜位置的面形解存在性进行了证明,并在带有 $90^\circ$ 旋转“U”型反转器的星光-拍瓦(XG-PW)装置上对腔反射镜位置大口径变形镜的应用进行了实验验证。理论和实验研究结果为后续大型激光装置的自适应光学波前补偿方案设计提供了依据。

**关键词** 自适应光学;多程放大器;“U”型反转器;腔反射镜;变形镜

**中图分类号** TN248.1;TL632+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2920

## Application of Cavity Deformable Mirror in Petawatt Facility with U-Turn Reverser

Dai Wanjun Hu Dongxia Zhou Wei Zhao Junpu Zhang Xin

Zhang Kun Jiang Xuejun Deng Wu Huang Xiaojun Zhu Qihua

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** For beam passing through cavity mirror twice in multi-pass amplifier laser facility, deformable mirror is often applied at location of cavity mirror for the goal of improving correction range. However, multi-pass amplifier with U-turn for improving optical quality has its own feature different from other facilities. Beam has  $90^\circ$  rotation and size change between 1~2 pass and 3~4 pass propagation. A new mathematical method is described to prove the solution existence of cavity deformable mirror and the application of cavity deformable mirror is verified in Xingguang-Petawatt (XG-PW), facility with U-turn reverser. The results are important for the adaptive optics system design of succeeding large-scale laser facility.

**Key words** adaptive optics; multi-pass amplifier; U-turn reverser; cavity mirror; deformable mirror

### 1 引 言

自适应光学(AO)技术已广泛应用于激光装置光束质量控制,补偿因光学元件加工误差等因素引起的静态像差,同时预补偿动态发射过程中由于热效应等因素引起的缓变像差<sup>[1,2]</sup>,在国内神光系列等装置上获得了很好的应用效果。由于国内大口径变形镜的研制技术尚未成熟,变形镜一般采用置于激光器前级的小口径预补偿方案,当补偿对象较大时(如将补偿范围延伸至靶点),闭环校正过程中激光在通过前级滤波器小孔时会发生一定程度的卡光问题,降低了波

前补偿的效果和到达末级的激光能量<sup>[3]</sup>。与国际上其他惯性约束聚变(ICF)激光装置相比较,美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)和法国的兆焦耳激光(Laser Megajoule, LMJ)等激光装置都采用了腔反射镜位置大口径变形镜技术方案<sup>[4~6]</sup>,一方面提高了变形镜的补偿量,另一方面也缓解了因闭环校正导致的卡光问题。国内神光III原型装置(Technical Integration Experiment Line, TIL)装置与NIF装置在结构上存在一定的区别,采用了变口径+ $90^\circ$ 旋转的“U”型反转器<sup>[7,8]</sup>,在不加任何主动控制技术的条件

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-10

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 代万俊(1981—),男,研究实习员,硕士,主要从事高功率固体激光装置光束质量控制方面的研究。

E-mail: dwj8wy@163.com

下,可以降低激光的输出像差。由于采用“U”型反转器后,激光两次经过腔反射镜位置的光束口径和坐标都发生了变化,需要研究变形镜置于该腔反射镜位置时能否实现闭环控制,并通过实验验证闭环控制的效果。

## 2 面形解存在性证明

由于光束在两次经过腔镜时光束口径和坐标方位发生了变化,腔镜位置变形镜的一个动作等效于对光束产生了两个不同的作用,见图 1 中字母“F”的变化。在这种光路下,对任意给定的系统波前畸变,腔镜位置变形镜面形解是否存在,是自适应光学技术能否闭环控制的一个原理性问题。

假定系统波前畸变为  $g(x, y)$ , 腔镜位置的面形为  $f(x, y)$ , 基于带“U”型反转器的多程放大光路特点,有

$$g(x, y) = 2f(x, y) + 2R\{C[f(x, y)]\}, \quad (1)$$

其中  $R(\cdot)$  代表  $90^\circ$  翻转变换;  $C(\cdot)$  代表口径变

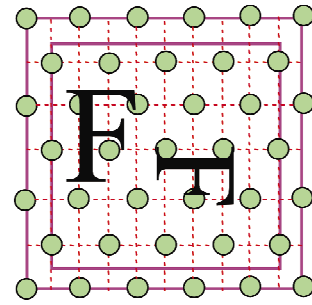


图 1 多程放大器变口径和  $90^\circ$  旋转示意图  
Fig. 1 Beam size change and  $90^\circ$  rotation in multi-pass amplifier

换。为计算方便将常数  $2$  忽略, (1) 式可变换为

$$f(x, y) = g(x, y) - R\{C[f(x, y)]\}. \quad (2)$$

假设  $a, b$  分别表示两次通过腔镜的光束口径大小, 在实际装置中假设  $0 \leq b \leq a$ , 则式(2)可表示为

$$f(x, y) = g(x, y) - f\left(-\frac{b}{a}y, \frac{b}{a}x\right), \quad (3)$$

其中  $-a/2 \leq x, y \leq a/2$ 。对右边第 2 项继续迭代, 可得到

$$f(x, y) = g(x, y) - g\left(-\frac{b}{a}y, \frac{b}{a}x\right) + g\left[-\left(\frac{b}{a}\right)^2x, -\left(\frac{b}{a}\right)^2y\right] - g\left[\left(\frac{b}{a}\right)^3y, -\left(\frac{b}{a}\right)^3x\right] + \dots + g\left[-\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-2}x, -\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-2}y\right] - g\left[\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-1}y, -\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-1}x\right] + f\left[\left(\frac{b}{a}\right)^{2n}x, \left(\frac{b}{a}\right)^{2n}y\right], \quad (4)$$

式中  $n$  为迭代次数;  $b/a$  表示光束两次通过腔镜位置的口径比, 这里简称为缩束比。令

$$h_n(x, y) = g\left[\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-4}x, \left(\frac{b}{a}\right)^{2n-4}y\right] - g\left[-\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-3}y, \left(\frac{b}{a}\right)^{2n-3}x\right] + g\left[-\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-2}x, \dots - \left(\frac{b}{a}\right)^{2n-2}y\right] - g\left[\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-1}y, -\left(\frac{b}{a}\right)^{2n-1}x\right], \quad (5)$$

则有

$$f(x, y) = \sum_{n=2}^{\infty} h_n(x, y) + f\left[\left(\frac{b}{a}\right)^{2n}x, \left(\frac{b}{a}\right)^{2n}y\right], \quad (6)$$

当  $b/a = 0$  时,  $f(x, y) = g(x, y) + C$ , 解存在。

当  $b/a = 1$  时, 有

$$h_n(x, y) = g(x, y) - g(-y, x) + g(-x, -y) - g(y, -x). \quad (7)$$

如果  $g(x, y) \neq g(-y, x)$ ,  $\sum_{n=1}^{\infty} h_n(x, y)$  不收敛, 解不存在; 如果  $g(x, y) = g(-y, x)$ , 即补偿像差满足  $90^\circ$  旋转对称性时,  $f(x, y)$  解存在。

当  $0 < b/a < 1$  时, 随着  $n$  趋于无穷大,  $X = (b/a)^{2n-2}x$ ,  $Y = (b/a)^{2n-2}y$  将趋近于零,  $H = \sum_{n=1}^{\infty} h_n(x, y)$  满足收敛条件,  $f(x, y)$  解存在。

综上所述, 只要口径变化关系满足  $0 \leq b/a < 1$ , 解存在。其中当  $b/a = 1$  时, 只能对某些特定的像

差有解, 例如离焦。

## 3 实验验证

星光拍瓦(XG-PW)激光装置主要用于快点火研究, 它主要由 6 个子系统组成, 包括前端、预放、主放、靶场(包括压缩)系统、光束控制与参数诊断系统、计算机集中控制系统, 其光路排布如图 2 所示。为了提高输出激光的光束质量, 主放大器采用了多程放大和“U”型反转器的结构设计, 与 NIF 和 LMJ 有所差异。为了校正拍瓦装置中的剩余像差, 在腔

反射镜位置放置如图 3(a)所示的大口径双压电薄膜变形镜(Bimorph mirror),在脉冲压缩器之前放置哈特曼波前传感器。激光两次经过腔反射镜位置的光束口径分别为 125 mm×125 mm 和 150 mm×150 mm,变形镜通光口径为 250 mm×250 mm,采

用 4 块 130 mm×130 mm 的小口径压电薄膜片拼接而成,整体粘结在镜面上。图 3(b)为双压电薄膜变形镜驱动器排布示意图,共 104 个驱动单元,实际光束口径内有 36 个有效驱动单元,配套的 4 套多通放大器,其中 3 套为 32 通,第 4 套为 8 通。

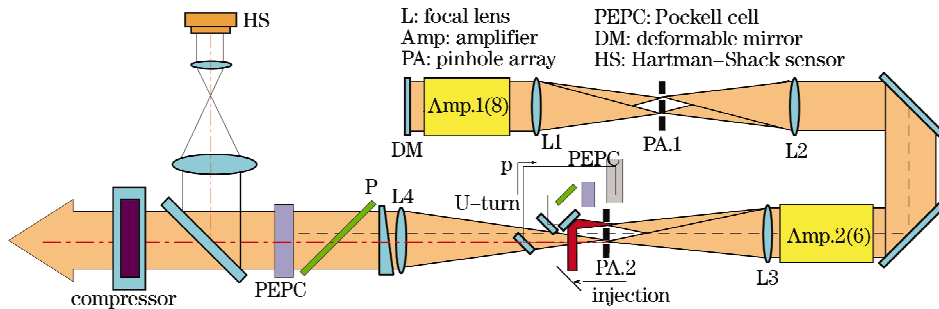


图 2 星光拍瓦激光装置示意图  
Fig. 2 Schematic drawing of XG-PW facility

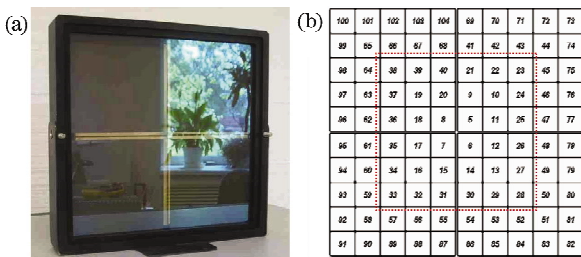


图 3 大口径双压电薄膜变形镜  
Fig. 3 Bimorph mirror with large aperture

图 4 为 AO 开环和闭环时,对输出像差连续采集后获得的 PV 值和 RMS 值的变化曲线。AO 开环时,PV 值在 1.3 λ ~1.85 λ 之间变化(如曲线 pv\_ol所示),RMS 值在 0.3 λ ~0.4 λ 之间变化(如曲线 rms\_ol 所示),这里 λ = 1.053 μm。当 AO 闭环时,PV 值在 0.2 λ ~0.5 λ 之间变化(如曲线 pv\_cl 所示),RMS 在 0.05 λ ~0.12 λ 之间变化(如曲线 rms\_cl 所示),输出像差有明显减小,充分显示了腔

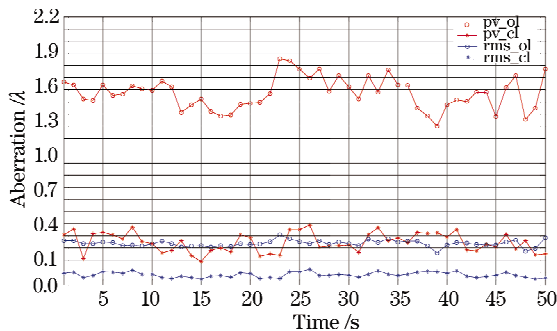


图 4 哈特曼传感器测量得到的波前  
Fig. 4 Wavefront aberration measured by Hartman sensor

反射镜位置大口径变形镜的波前控制能力。为了更加直观地看出 AO 控制后的效果,在压缩器之前搭建远场测量平台,分别测量 AO 开环和闭环时的远场分布,测量结果如图 5 所示。对比发现,AO 闭环后远场能量集中度大大提高,由多峰结构变为明显的单峰结构。

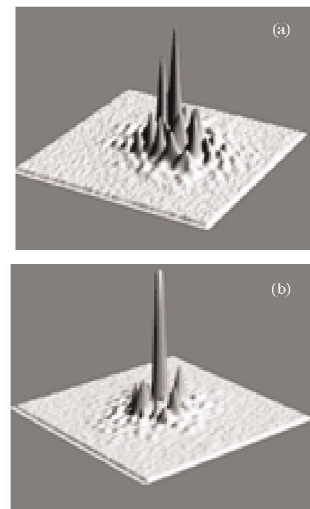


图 5 远场分布。(a) AO 开环;(b) AO 闭环  
Fig. 5 Measured far-field, (a) AO is open loop; (b) AO is closed loop

### 4 结 论

通过数学的方法充分证明了在带有变口径+90°反转的“U”型反转器的多程放大系统中,对于任意的输出像差,在腔反射镜位置进行补偿的面形解是存在的。并通过在具有上述特点的星光拍瓦装置上开展了验证实验,实验与理论具有一致性,研究成

果为星光拍瓦装置上自适应光学校正技术的应用提供了理论依据,也为神光Ⅲ装置自适应光学技术应用方案设计提供了理论指导。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Zhengang, Chen Haiqing, Li Jie *et al.*. Lasers aberration compensation using an intra-cavity adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2205~2208  
杨振刚, 陈海清, 李 捷 等. 内腔自适应光学系统校正激光器畸变[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2205~2208
- 2 Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin *et al.*. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10): 895~899  
金 钢, 刘顺发, 李树民 等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10): 895~899
- 3 Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei *et al.*. Application of adaptive optics technique in TIL facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(S1): 102~106  
代万俊, 胡东霞, 周 维 等. 神光Ⅲ原型装置自适应光学系统应用研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(S1): 102~106
- 4 Richard A. Zacharias, Erlan S. Bliss, Scott Winters *et al.*. Wavefront of high-power laser beams in the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 332~343
- 5 M. L. Spaeth, K. R. Manes, C. C. Widmayer *et al.*. National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(12): 2854~2865
- 6 Alexis Kudryashov, Alexander alexandrov. beam correction in high peak power lasers [C]. *Laser Optics International Conference*, St. Petersburg, Russia, June 23-28, 2008
- 7 Liu Lanqin, Jing Feng, Peng Zhitao *et al.*. Study of the static wavefront distortion of optics elements in the multi-pass amplification system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 241~244  
刘兰琴, 景 峰, 彭志涛 等. 多程放大系统光学元件静态波前畸变研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 241~244
- 8 Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin *et al.*. Optimization of optical design of the master amplifier in multi-pass off-axis amplification system. [J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, **55**(10): 5277~5282  
王 方, 朱启华, 蒋东宾 等. 多程放大系统光学设计优化 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5277~5282