

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0086-08

热容激光器内腔主动光学系统的数值模拟

王小军 张飞舟

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要 构建了内腔主动光学(ICA0)系统的工作流程模型,并通过数值模拟验证了在高功率固体激光器中使用 ICA0 进行波前校正的可行性。利用一个具有严重热致像差的千瓦级热容激光器,说明 ICA0 系统对该激光器的输出性能有本质性提升,由此验证了 ICA0 布局和控制算法的可行性。物理上 ICA0 系统与腔内其他物理现象存在复杂的耦合,数值模拟表明这种耦合使得系统对大的误差比较敏感,因此要求在所需求补偿的像差阶数、波前传感器子孔径数目和变形镜单元数之间有恰当的匹配关系。

关键词 激光器;热容激光器;自适应光学;光束质量控制

中图分类号 TN242 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0086

Numerical Simulation on Intracavity Adaptive Optic System in Heat Capacity Laser

Wang Xiaojun Zhang Feizhou

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract A theoretical model on the intra-cavity adaptive optic (ICA0) system is proposed. The method of numerical simulation is used to prove its possibility in the high power solid-state lasers. The study on a heat capacity laser with larger intra-cavity aberrations and kilo-watt output shows that the ICA0 system improves the beam quality significantly. Therefore, the ICA0 configuration and the control process are checked theoretically. Physically there are complicated non-linear couplings among ICA0 and other physics processes inside the resonator. The simulations show that the ICA0 system is sensitive to certain errors due to these couplings. Therefore, a subtle match among number of the sub-piles of the wavefront sensor, unit distribution of the deformable mirror and order of the aberrations expected to be compensated is required.

Key words lasers; heat capacity laser; adaptive optics; beam quality control

1 引 言

随着固体激光器向高平均功率的发展,使用大口径片状增益介质加非稳定谐振腔成为可能的技术路线之一,典型的如 Lawrence Livermore 实验室(LLNL)热容激光器^[1]和波音公司的薄片激光器^[2]。对于片状增益介质而言,激光对温度场的横向不均匀性是非常敏感的。因此为获得高光束质量输出,需要使用主动光学(AO)系统对光束波前进行校正^[3]。但高功率加载的增益介质所产生的严重光学畸变非常容易在输出光束的波前导致 10 倍波长以上的波前畸变。这样的波前畸变大大超过了变形

镜(DM)致动器的最大行程,因此难以直接进行补偿。注意到光在非稳定谐振腔中的振荡过程中,介质的光学畸变导致的像差会被放大,因此在腔内适当位置放置变形镜可以大大降低对致动器最大行程的要求。另一方面,介质的光学畸变会改变腔模的形状和体积,进而影响到能量的提取效率,例如热透镜会减小腔模的体积从而降低输出功率。因此使用内腔 AO(ICA0)系统的另一个优势是可以提升能量的提取效率。

ICA0 系统的要点之一是由探测到的光的波前像差求解变形镜理论面形的算法。在小像差近似

收稿日期: 2009-12-01; 收到修改稿日期: 2010-01-25

基金项目: 中国工程物理研究院基金(2007B09006)资助课题。

作者简介: 王小军(1973—),男,博士,副研究员,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: wang_xiaojun@iapcm.ac.cn

下,该算法与腔的几何参数以及变形镜的位置有关^[4,5],还与探测光的光程设计相关。本文将研究通过探测输出激光束的波前相位来驱动 ICAO 系统的可行性。此设计可以省略探测光生成和耦合系统,从而大大简化了系统光路。另外,在高平均功率固体激光器(HAPSSL)中激光场的提取过程影响到介质的产热,从而造成激光和热的耦合^[6]。由于 ICAO 系统影响到激光场的分布,光热耦合进一步造成 AO 系统与腔内其他物理因素的非线性耦合。在 AO 的工作过程中这类耦合会改变光束的波前像差结构,因此需要使用全过程的耦合分析来探讨对 ICAO 系统的技术要求。

2 ICAO 的工作原理

在非稳定腔内使用 AO 系统的理论研究始于 20 世纪 80 年代^[4,5],而在高能激光器上的成功使用

始于 Lawrence Livermore 实验室的 10 kW 热容激光器。该激光器的 ICAO 系统成功地在 5 s 工作内将光束质量始终控制在 3 倍衍射极限(DL)内^[7]。参考 LLNL 的光路设计,考虑如图 1 所示的 ICAO 系统布局。该设计与 LLNL 的 ICAO 系统最大的不同是探测光为在输出镜前分束得到的一束弱激光,即探测激光器起振后腔模的波前像差。对于千瓦级输出,可以取分束器的反射率为 99.95%,这样在波前传感器(WFS)设置适当的衰减后,可以屏蔽激光起振前的杂散光。该布局中的近场探测器得到的强度分布与 WFS 探测的波前组合后可以计算出一个理论远场分布,将其与远场探测器得到的结果比较可以监测 WFS 的波前探测效果。另外,对于这样的结构起偏器是必要的,否则介质的应力双折射效应可能严重影响到 AO 的探测和补偿效果。

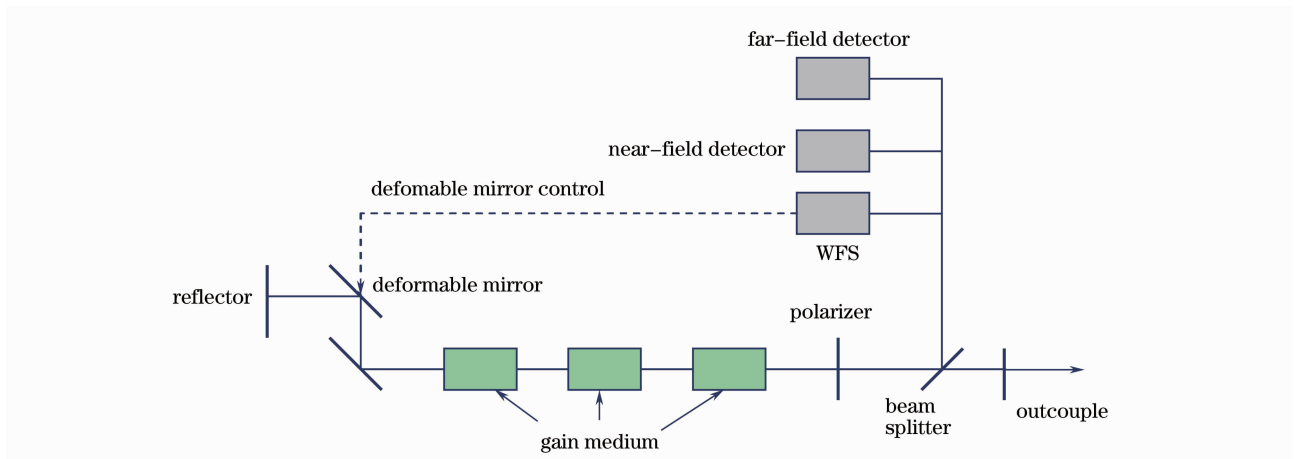


图 1 ICAO 布局示意图

Fig. 1 Schematic configuration of the intra-cavity AO system

注意到光在带有畸变的非稳定腔内一次或多次振荡后带来的波前像差和腔内的固有像差是不重合的,因此如果使得变形镜面形共轭于波前传感器的探测结果,即使在波前传感器的探测位置放置变形镜也不能正确校正腔内的固有像差,更何况技术上的便利通常要求波前传感器和变形镜放置在不同位置。因此,ICAO 系统的要点之一是由 WFS 探测到的波前像差求解变形镜理论面形的算法。对于如图 1 所示的构型,该算法由腔对像差的敏感度^[8]决定

$$\begin{aligned} \varphi_{in}(x, z_i) &= \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j^{in}(z_i) x^j, \\ \varphi_{out}(x) &= \sum_{j=0}^{\infty} \alpha_j^{out} x^j, \\ \alpha_j^{out} &= \sum_{i=1}^m \sum_{2 < k < j} \nu_{jk}(\alpha_k^{in}, z_i) \alpha_k^{in}(z_i), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 φ_{in} 和 φ_{out} 分别表示腔内固有像差面诱导像差和输出激光(腔模)场波前像差, z_i 为像差面距输出镜的距离, x 为垂直于光轴的平面坐标。由(1)式可知,一般情况下 φ_{out} 和 φ_{in} 之间存在非常复杂的非线性关系^[9]。但当固有像差不太大时,可以假定,光线在一个有像差的腔内传播,其几何路径并不发生改变,而输出光场的波前结构则由光场通过各像差面后的附加相因子给出。此时一个腔长 L , 放大率 M 的正支共焦非稳定腔对像差的敏感度约化为线性关系式

$$\alpha_j^{out} = \sum_k \frac{\alpha_k^{in}(z_k)}{M^j - 1} \left[M^j + \left(1 + \frac{z_k}{L} (M - 1) \right)^j \right]. \quad (2)$$

如果在距输出镜 z 的位置放置变形镜,那么利用(1),(2)式,由输出激光场波前求解变形镜理论变

形量的算法是

$$\varphi_{\text{out}}(r, \theta) = \sum_j c_j(\theta) r^j \rightarrow \varphi_{\text{DM}}(r, \theta) = - \sum_j \left[M^j + \left(1 + \frac{z}{L} (M-1) \right)^j \right]^{-1} (M^j - 1) c_j(\theta) r^j, \quad (3)$$

式中 (r, θ) 为像差面的极坐标。因此图 1 中的内腔 AO 系统的工作流程示意如图 2 所示。这里需要使

用模式法重构波前,并且需要一个从模式法的正交多项式到幂级数展开的变换。

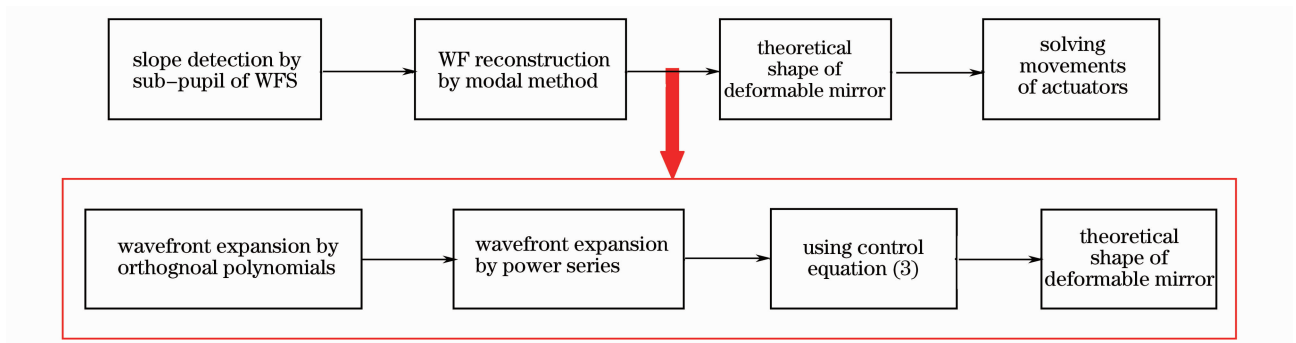


图 2 ICAO 工作流程示意图

Fig. 2 Working process of the intra-cavity AO system

3 热容激光器中的 ICAO 系统

提出热容激光器概念的初衷是希望通过避免冷却造成的温度不均匀性以提高光束质量。但在实验过程中,发现在高功率工作状态下该激光器对抽运光加载的横向不均匀性非常敏感^[10],在目前的技术能力之下仍然难以实现高光束质量输出,加上该系统在时域上存在演化过程,因此是一个比较理想的验证 ICAO 系统工作过程的平台。这里模拟如下的热容激光器:增益介质使用两片 1% 掺杂的 Nd:YAG,口径 40 mm,厚度 15 mm;正支共焦非稳定腔长 2 m,放大率 2.0,输出镜口径 13 mm;增益介质分别放置于距输出镜 0.8 m 和 1.2 m 的位置,变形镜放置于距凹镜 20 cm 处;每片增益介质使用两个峰值功率 18 kW 的

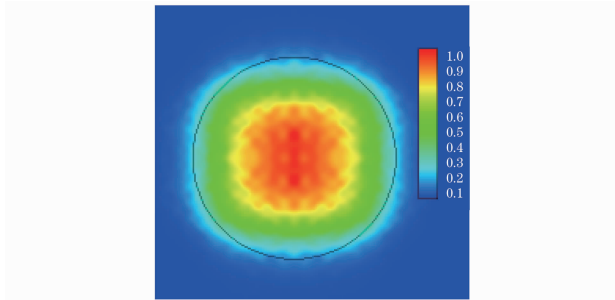


图 3 抽运光分布(图中黑圈对应于增益介质口径)

Fig. 3 Distribution of the pumping beam
(circle corresponds to gain medium)

激光二极管(LD)阵列端抽运,占空比 15%。考虑到抽运光的谱线宽度和中心波长漂移后,增益介质对抽运光的平均吸收系数为 2.7 / cm。为了明确地显现 ICAO 的校正效果,使用如图 3 所示的抽运光分布,该分布的较差均匀性使得不太大的输出功率也可以产生非常严重的像差。模拟中所使用的其他材料及激光动力学参量如表 1 所示。

表 1 模拟中所使用的 Nd:YAG 材料及激光动力学参量(300 K)

Table 1 Material parameters used by the simulation(300 K)

Parameters	value
Density / (g / cm ³)	4.56
Specific heat / (J · g ⁻¹ · K)	0.59
Thermal conductivity / (W · K ⁻¹ · cm)	0.12
Modulus of elasticity / (10 ⁵ MPa)	3
Pisson ratio	0.25
Thermal expansion / (10 ⁻⁶ K)	7.5
dn/dT / (10 ⁻⁶ K)	7.3
Simulated emission cross section(R ₂ → Y ₃) / (10 ⁻¹⁹ cm ²)	6.5
Fluorescence lifetime / μs	230
Index of refraction	1.82
Ratio of heat generation (unextraction) / %	43

利用 ANSYS 有限元分析软件模拟计算表明,不出光时晶体的最高温度在工作 2.5 s 后会升高到 430 K,因此模拟计算中需要考虑到晶体的比热容和热导率随温度的变化。另外注意到如果激光器的光-光转换效率达到 25%,则腔内光场在某个横截面的平均强度约为 4 kW/cm²,大于饱和光强 $I_s = 2.9 \text{ kW/cm}^2$ 。因此还需要考虑激光场对晶体产热的影响^[6~11]

$$\Phi(x) = \Phi_0(x) \left[1 - \gamma \frac{I(x)/I_s}{1 + I(x)/I_s} \right], \quad (4)$$

式中 Φ_0 为不出光时的热加载功率密度, I 为激光场强度分布;唯象因子 $\gamma=0.5$,对应于 $I \gg I_s$ 时产热比率下降到 34%。考虑到热光效应、晶体表面变形和应力双折射对激光场的影响后,(4)式实际上造成了激光场和温度场之间的耦合。而在使用 ICAO 后,由于变形镜影响到激光场的产生过程,进一步造成 AO 系统和前述的各物理现象之间的非线性耦合。这种耦合是如此复杂,以致于目前还没有办法通过一般性的分析讨论系统的稳定性,因此这里将主要关注考虑到这些耦合后,使用图 1 构型的 ICAO 系统的可行性。需要说明的是,由于腔内放置有起偏器,这里将不考虑应力双折射对光束质量以及 AO 系统的影响,而在模拟中将起偏器等效为一个腔损耗因子。

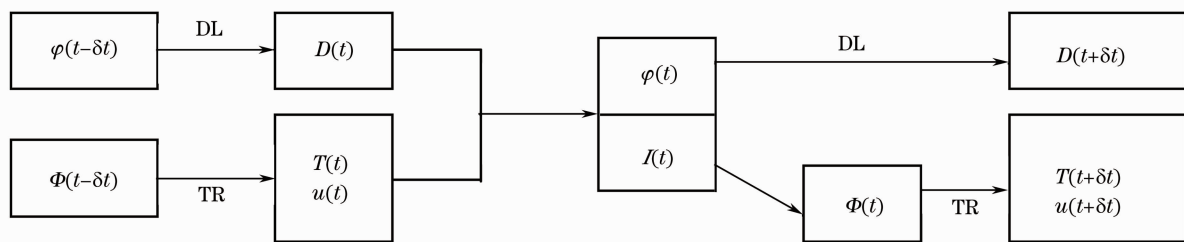


图 4 时域上对耦合过程的交叉解耦描述

Fig. 4 Decoupling method in time domain on coupling processes

使用如图 3 分布的抽运光加载毫无疑问存在非常严重的热透镜效应,模拟结果表明,如果不使用 ICAO,当工作到 0.8 s 时,光束质量按照环围半径定义已经达到 25 倍衍射极限,输出功率也下降约 10%(图 5),此时输出光束波前的最大落差值(PV)达到 9 倍波长,那么按照热容激光器的线性演化规律外推到工作 2.5 s 时波前的 PV 值将达到 27 倍波长。按照(3)式可知此时变形镜的面形 PV 值需要达到 7 μm 左右(考虑到变形镜的反射工作方式),取变形镜致动器最大行程 ±4 μm。作为一个验证

4 数值模拟和讨论

在前述的非线性耦合不造成不稳定性的情况下,对图 1 中的 AO 系统来说,影响到其校正效果的主要因素有:变形镜控制算法(3)式的误差,AO 的闭环响应速度,WFS 的探测精度以及变形镜(DM)的面形重构残差。通过模拟研究,希望能回答下面几个问题:1)实际上增益介质带来相当严重的像差,那么小像差的线性近似公式(3)是否还是有效的? 2)理想状况下要求 AO 系统校正什么样的像差? 要求 WFS 的识别能力如何? 变形镜的面形重构残差在多大程度上影响到校正效果? 3)对 AO 的闭环响应速度有何要求?

对 AO 的闭环响应速度有影响的主要是 WFS 的曝光时间和变形镜的控制延迟,其中前者远小于后者,因此在模拟中将不考虑 WFS 的曝光过程。另外由于温度场在时域上是一个缓变量,光场和应力对温度场变化的响应时间则非常短,因此可以假设在一个控制延迟 δt 内温度场变化对激光场的改变可以忽略,那么取 δt 为数值模拟的时间步长则可以按图 4 在时域上对前述的耦合过程进行交叉解耦描述。图中 D, T, u, Φ 分别为变形镜面形、温度场、晶体表面形变量和产热功率密度; I 和 φ 分别为激光场强度和相位;“DL”和“TR”分别表示变形镜的控制延迟和温度场的时间演化。

性而非设计性模拟研究,暂不考虑其他工程技术上的限制条件,如致动器间距、表面应力等。

首先来分析腔内的像差结构和对 WFS 的辨别能力的要求,为此,先使用理想的变形镜进行校正,这里“理想”指变形镜可以精确地重构出所要求的面形。这时对 AO 系统补偿效果有影响的系统误差主要是:WFS 的波前重构误差、小像差公式(3)式的解算误差以及在控制延迟内由于温度场变化导致的光场变化。先尝试性地取控制延迟为 20 ms。在图 6 中,给出了使用 N 单元子孔径的 Hartman WFS 对前 M 阶

Zernike 像差进行校正后的光束质量(各种输出功率都基本不随时间变化,因此没有给出功率曲线图)。由图可知,只要能够对前 27 阶 Zernike 像差进行较好

的补偿就能够实现光束质量非常好的输出,而使用 52 单元的 WFS(子孔径排布方式见图 7)就可以对前 27 阶 Zernike 具有足够好的识别能力。

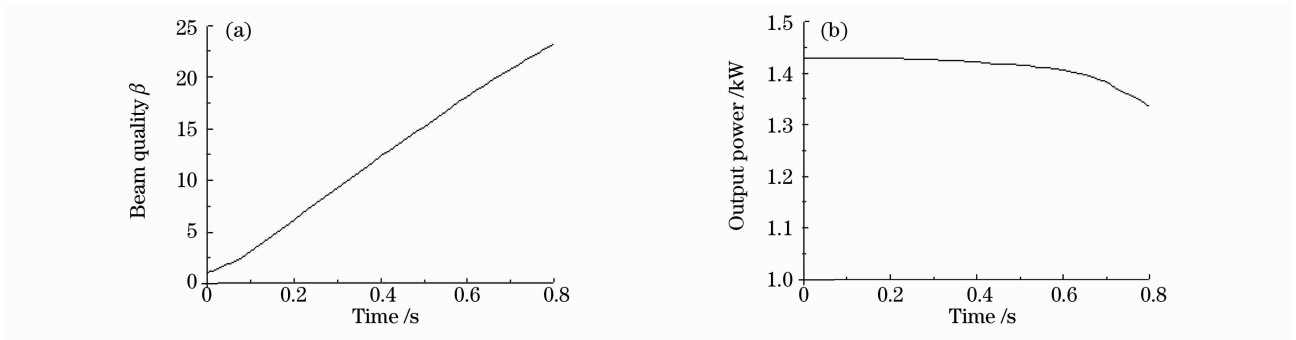


图 5 不使用 ICAO 时的光束质量(a)和输出功率(b)随时间的变化

Fig. 5 Beam quality (a) and output power (b) as functions of time without ICAO

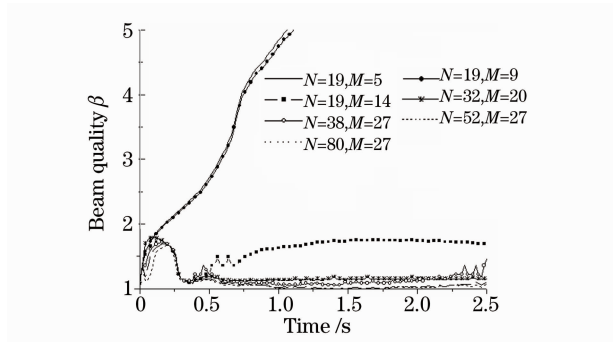


图 6 使用 N 单元子孔径的 Hartmann WFS 对前 M 阶 Zernike 像差进行校正后的光束质量,这里使用理想变形镜,控制延迟 20 ms

Fig. 6 Beam quality correcting the top M order Zernike aberrations by an N -unit Hartmann WFS, using ideal DM with control delay 20 ms

图 6 的结果也说明使用小像差算法(3)式是可行的,这是因为 AO 从初始时刻的小像差就进行动态补偿,尽管后来增益介质带来相当严重的像差,但在每个时间步 WFS 探测到只是一个很小的像差,因此算法(3)式具有足够的精度。但如果 AO 探测和补偿起始于一个较大的像差,或者时间步长大到

不能保证每个时间步的像差不足够小,(3)式的精度则不能被保证。在图 8 中给出了 $N=52, M=27$ 时不同的控制延迟对校正效果的影响,这里仍然先使用理想变形镜。可以看到,延迟大于 20ms 将对校正效果产生明显影响。

下面来模拟变形镜的面形重构残差的影响。取变形镜口径 32 mm(为输出光束口径的 1.2 倍),致动器的面形影响函数取高斯函数

$$\varphi(x, y) = \sum_{k=1}^M a_k f_k(x, y),$$

$$f_k(x, y) = \exp\{-s[(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2]/d^2\},$$

(5)

式中 (x_k, y_k) 为致动器位置, d 为致动器间距,控制参数 s 取值 2.2。图 9 给出了各种参数下输出光束质量随时间的变化。图 10 对比了 $N=52, M=27$, 致动器数目 $K=37$ 时变形镜的理想面形和最小二乘法拟合得到的交叉耦合面形(致动器排布见图 7)。图 11 则对不使用 AO, $t=0.8$ s 以及使用 $N=52, M=27, K=37$ 的 AO 系统, $t=2.5$ s 的腔模和输出光束的远场衍射进行了比较。从这些结果

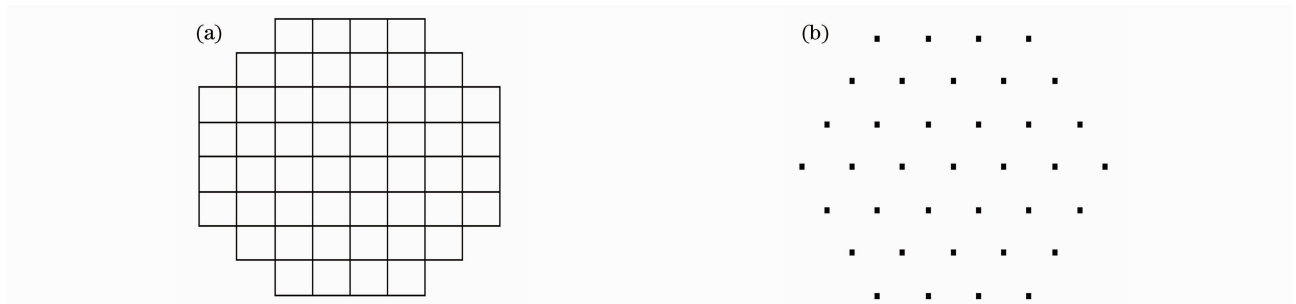


图 7 52 单元 WFS 子孔径排布(a)和 37 单元 DM 致动器排布(b)

Fig. 7 Distributions of WFS with 52 sub-pupils (a) and DM with 37 actuators (b)

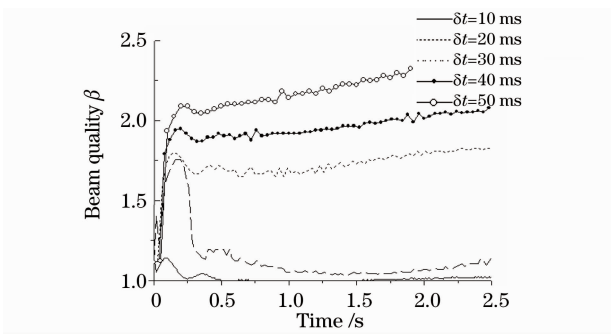


图 8 $N=52, M=27$ 时,使用理想变形镜,在不同控制延迟 δt 校正后的光束质量
Fig. 8 Beam quality with different control delays by using ideal DM ($N=52, M=27$)

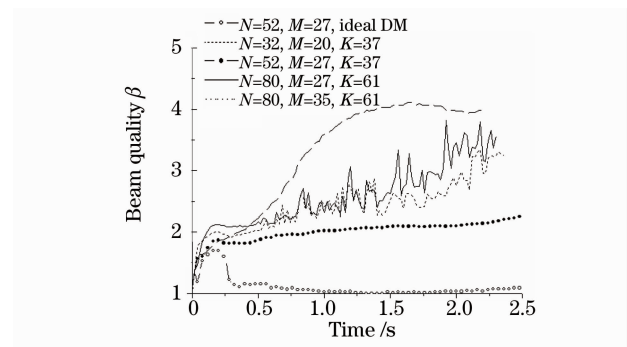


图 9 使用非理想变形镜进行校正后的光束质量(控制延迟 20 ms)
Fig. 9 Beam quality after using unideal DM with control delay of 20 ms

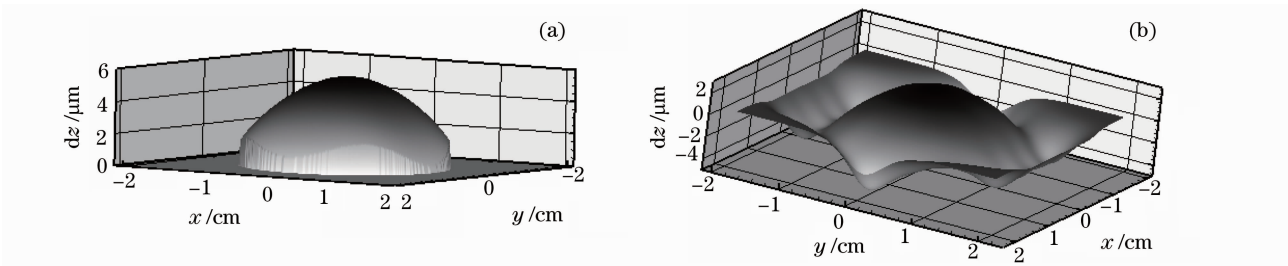


图 10 变形镜理想面形(a)和 $K=37$ 的交叉耦合面形(b)($N=52, M=27$)
Fig. 10 Surface shapes of an ideal DM (a) and real DM with 37 actuators (b) ($N=52, M=27$)

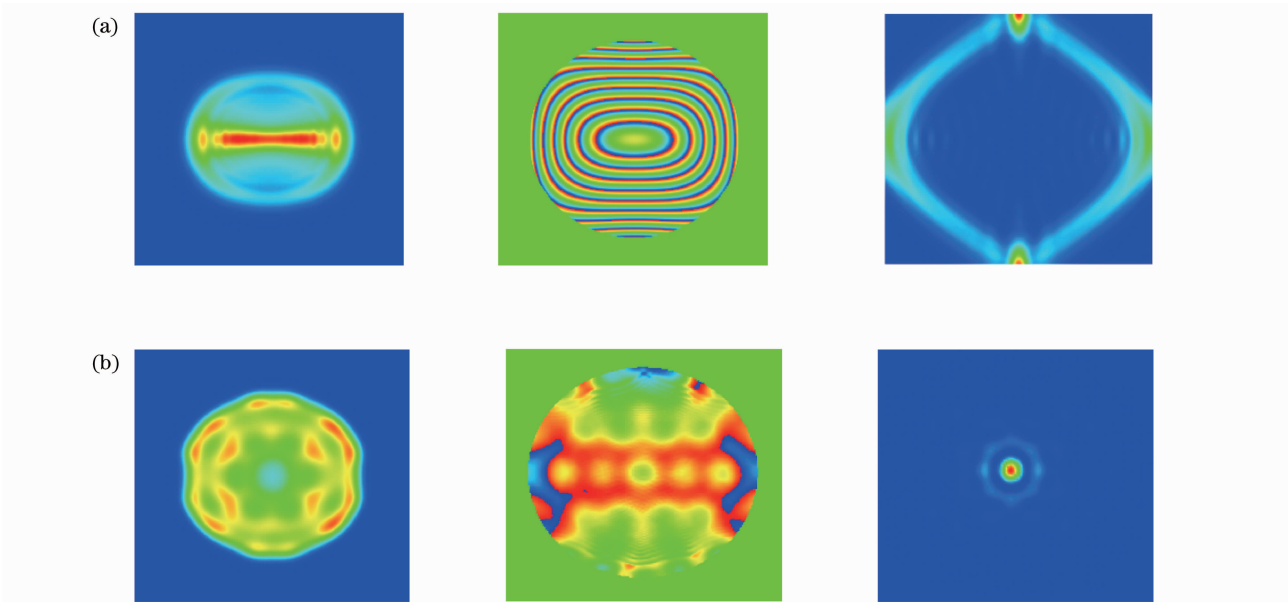


图 11 腔模的强度、相位分布和输出光束的远场衍射斑。(a) 不使用 ICAO, $t=0.8$ s, 光束质量 25 倍衍射极限, (b) 使用 ICAO($N=52, M=27, K=37$)后, $t=2.5$ s, 光束质量 2.4 倍衍射极限

Fig. 11 Intensity and phase of cavity mode, and spot of fraunhofer diffraction. (a) $t=0.8$ s

(without ICAO, beam quality $25 \times DL$), (b) $t=2.5$ s [with ICAO ($N=52, M=27, K=37$), beam quality $2.4 \times DL$]

中可见,考虑到非理想的变形镜之后,ICAO 也对光束质量有本质性的提升作用,但非理想变形镜的面形极大地影响到了 AO 补偿效果,这些影响主要来自两个方面:1)是由(5)式决定的变形镜面形重构带

来的高频像差,这些像差由致动器间距和各致动器行程决定,因此原则上属于变形镜的系统误差,即使 WFS 能够识别这些像差变形镜也难以对其进行好的补偿。2)是变形镜的边缘在腔模的形成过程中存

在对腔模的衍射调制,在图 11(b)中可以清楚地看到腔模呈现出六角形分布,这显然是由于图 7(b)中的致动器排布造成的。由图 9 还可以看到,提高 WFS 和变形镜的单元数并不一定能提升 ICAO 的校正效果,而且当 WFS 子孔径数,DM 的致动器数目以及用以重构波前的 Zernike 多项式阶数不能匹配时,出现明显的不稳定(振荡)现象。由于 AO 系统和腔内其他物理现象的非线性耦合,出现这种现象的原因非常复杂,大体上主要原因是随着变形镜致动器数目的增加,在光的波前所诱导出的高阶像差越严重,而且理论可以证明^[8],光在振荡过程中反复通过固有像差面的行为可以诱导出比固有像差面更严重的高阶像差。这样的高阶像差由于 WFS 子孔径数目的限制不能被很好识别,并且在波前重构的时候不能被较低阶的 Zernike 多项式重构出来;即使通过增加 WFS 子孔径数目以及多项式阶数被识别出来,由于这些像差来自于变形镜自身的构型,对其进行校正则会破坏对所要求的理想面形的最佳逼近拟合,从而降低对腔内固有像差的校正效果。进一步注意到在 AO 反复地对热容激光器随时间增长的像差进行校正的过程中,变形镜的拟合残差也在不断累积。这些高阶的累积残差刚开始时占整个波前像差的权重较小,并不能在波前重构过程中通过最佳平方逼近反映出来,因此也没有得到补偿;而当其累积到权重较大时,则可以在探测过程中被部分重构并在一定程度上得以校正,从而形成图 9 中光束质量的振荡现象。

5 结 论

提出一种通过探测腔模相位对使用非稳定谐振腔的高平均功率固体激光器进行 ICAO 校正的方案,并给出了从 WFS 传感器重构出的波前求解出在腔内给定位置的变形镜理论面形的控制算法。为验证此方案的可行性,模拟了一个具有严重像差的千瓦级热容激光器,该激光器使用正支共焦非稳定腔。物理上,由于 ICAO 系统参与了腔模的振荡形成,造成 AO 系统与其他物理现象的复杂耦合。利用各物理现象具有不同特征时间尺度的特点,在时域上可以进行交叉解耦分析来描述带有 ICAO 的热容激光器的工作过程。模拟结果表明,使用 52 单元的 WFS 和 37 单元的变形镜对前 27 阶 Zernike 像差进行校正后,光束质量从工作 0.8s 时的 25 倍衍射极限提升到工作 2.5s 时的 2.4 倍衍射极限。因此 ICAO 系统的使用对该激光器的输出性能有本质

性的提升,从而说明了 ICAO 校正方案的可行性。

仔细分析了此 ICAO 系统的系统误差起源。模拟结果表明,当变形镜致动器的排布和单元数不能匹配腔内的固有像差时,变形镜的面形重构残差会对整个 AO 系统的补偿效果产生严重的影响。其主要原因仍然是变形镜参与了腔模的振荡形成过程,因此变形镜面形会诱导出原本没有的高阶像差。这样的高阶像差难以被 AO 系统校正,一方面由于 WFS 子孔径数目的限制不能被很好识别,并且在波前重构的时候不能被较低阶的 Zernike 多项式重构出来;另一方面即使通过增加 WFS 子孔径数目以及多项式阶数被识别出来,由于这些像差来自于变形镜自身的构型,对其进行校正则会破坏对所要求的理想面形的最佳逼近拟合,从而降低对腔内固有像差的校正效果。因此,在不分析腔内固有像差构成的情况下,盲目地提升变形镜分辨率,除带来工程技术的难题外,并不能保证提高 ICAO 系统在具体激光器上的应用能力,在一定情况下,甚至会降低 ICAO 的性能并且引起系统的不稳定。

另外,小像差近似下的控制算法带来的误差可以通过缩短 AO 系统的控制延迟,从而使得每个时间步探测到光的波前像差都较小得到控制。但随着工作时间的延长,当变形镜的面形起伏量和固有像差都较大时,仍然会导致一定的系统误差,因为此时小像差近似的假定条件——“像差面不改变光的几何路径”已经不能较好地满足。特别是因为 ICAO 应用到一些具有大像差的、稳态工作模式的固体激光器时,可能会有较大的误差,但对于该类激光器,由于 AO 系统的闭环迭代逼近是有效的,仍然可以使用该控制算法。

参 考 文 献

- 1 R. M. Yamamoto, J. M. Parker, K. L. Allen *et al.*. The solid-state heat-capacity laser (SSHCL) program at LLNL[C]. Proc. of the Eighth Annual Directed Energy Symposium, 2005
- 2 J. Vetrovec, R. Shah, T. Endo *et al.*. Progress in the development of solid-state disk laser[C]. SPIE, 2004, **5332**: 235~243
- 3 Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao *et al.*. Relationship between Zernike wavefront errors and beam quality factor β for optics system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1420~1427
叶红卫, 李新阳, 鲜浩等. 光学系统的 Zernike 像差与光束质量 β 因子的关系[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1420~1427
- 4 K. E. Oughstun. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations I: analysis[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 862~872
- 5 K. E. Oughstun. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations. II: passive cavity study for a small Neq resonator[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(10): 1180~1192
- 6 Wang Xiaojun. Optic-thermal coupling in high-power diode

- pumped solid-state lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20** (5): 705~709
- 王小军. 二极管泵浦高能固体激光器中的光热耦合现象[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20** (5): 705~709
- 7 K. N. LaFortune, R. L. Hurd, J. M. Brase *et al.*. Intracavity, adaptive correction of a high-average-power, solid-state, heat-capacity laser[C]. *SPIE*, 2005, **5708**: 1~7
- 8 K. E. Oughstun. Aberration sensitivity of unstable-cavity geometries[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1113~1141
- 9 X. J. Wang. Non-linear corrections to aberration sensitivity of unstable-cavity geometries[J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (26): 21223~21232
- 10 Cai Zhen, Jiang Jianfeng, Hu Hao *et al.*. Kilowatt high power heat capacity laser with 3 times diffraction limit[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2266~2271
- 蔡震, 蒋建锋, 胡浩等. 千瓦级3倍衍射极限的高功率热容激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2266~2271
- 11 W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 43