

文章编号: 1001-4322(2004)09-1161-05

## 多程放大腔镜准直研究\*

刘代中, 徐仁芳, 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

**摘 要:** 针对高功率激光装置对多程放大器腔镜准直的要求, 利用小孔的像传递和光路自动准直的原理, 设计出一套创新的腔镜准直调整方法, 并且在 SG-III 原型装置 4 程放大模拟实验平台上进行了实验验证。实验结果表明: 自动准直系统能够在 15min 之内顺利完成主放大级系统的光路调整, 光束近场调整精度值小于近场光斑直径的 0.5%, 光束远场调整精度小于 0.3"。

**关键词:** 激光技术; 自动准直; 像传递; 多程放大

**中图分类号:** TN242

**文献标识码:** A

目前, 国内外用于惯性约束聚变的高功率激光装置的总体设计主要采用多程放大的光路结构, 多程放大光路是充分发挥了高功率激光装置的主放大器的放大作用, 使主激光在主放大器里面来回多次穿过空间滤波器的多个小孔, 同时经历多次放大, 提高了主放大器的工作效率<sup>[1]</sup>。应用多程放大光路比较典型的有美国的 NIF 装置、法国的 LMJ 装置和我国的 SG-III 装置, 这种光路结构对腔镜的调整精度要求非常高, 例如 SG-III 原型装置要求达到 1"。本文利用小孔像传递原理和光路自动准直技术, 设计出一套新的腔镜准直方案, 并且在 SG-III 原型装置 4 程放大模拟实验平台上得到了实验验证。

### 1 小孔像传递

高功率激光装置一般按照像传递原理来设计和构造主光路<sup>[2,3]</sup>, 即利用空间滤波器的成像作用, 将振荡器输出的均匀强度分布(物)在光路中逐级传递, 重新成像在放大器和频率转换装置的附近, 从而使强度噪声增长在原始输入分布的像平面上复位到零, 以达到完善光束质量的目的。以美国 NIF 装置为例<sup>[1]</sup>, 其光学元件主要包括腔镜 1、腔镜 2, 4 个小孔和空间滤波器的一对透镜。由空间滤波器像传递的结构设计可知, 小孔板在一对透镜的公共焦面上, 两个腔镜 1 和 2 也正好各在两个透镜的另一个焦面上。因此小孔 2 正好位于小孔 1 的像平面上, 小孔 3 在小孔 2 的像平面上, 小孔 4 也正好在小孔 3 的像平面上。这样小孔板上 4 个小孔依次形成了小孔像传递关系。

### 2 光路自动准直系统

#### 2.1 准直基本原理

光路中引起光轴漂移的因素很多, 如空间滤波器透镜的畸变、棒放大器和片状放大器的热畸变、反射镜的轻微抖动等, 所有这些都归结为光轴的失调, 也就是说可以认为所有光学元件的同轴性很好, 入射的光束发生了角移和平移, 即光束的入射角度和位置发生了偏移。光轴的失调可以由两块反射镜改变其倾角后得到纠正, 即入射的光轴虽然发生了角移和平移, 但经过两块反射镜后出射的光轴却和理想的光轴重合。光路自动准直系统一般在主光路以外设置光学探测采样系统监视光束的位置和角度, 将探测采样系统设在光路中相隔一定距离的两个位置, 依据“不重合的两点决定一条直线”的原理, 来调整光路<sup>[4,5]</sup>。通常将一点取在光路像传递像面处, 称为近场; 另一点取在焦点处, 相当于无穷远的位置, 称为远场。在近场监视光束的平移, 在远场监视光束的角移。准直调整时计算机采集近远场的摄像机信号, 如图 1 所示, 经过一系列的图像处理, 找到被调整光束的中心误差, 根据这一误差驱动伺服反射镜上的电机恢复光轴的位置。

#### 2.2 近场和远场

光路自动准直系统按照像传递来建立近场和远场探测系统。由于大型高功率激光惯性约束聚变装置中

\* 收稿日期: 2003-09-27; 修订日期: 2004-05-13

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 刘代中(1973—), 男, 博士研究生, 从事高功率激光装置的光束自动准直研究工作; 上海市 800-211 信箱; E-mail: dzhliu@mail.shcnc.ac.cn.

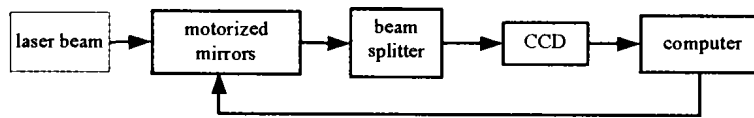


Fig. 1 Alignment close-loop

图 1 准直闭环反馈系统

主要的光学成像系统是空间滤波器,空间滤波器的成像作用早有论证,现在我们只考虑一级空间滤波器。图 2 所示为近场像传递图,平行光束从前端入射。A 面是空间滤波器前面的某一物面,B 面是 A 面的像面,也是近场观察面(CCD 探测面)。

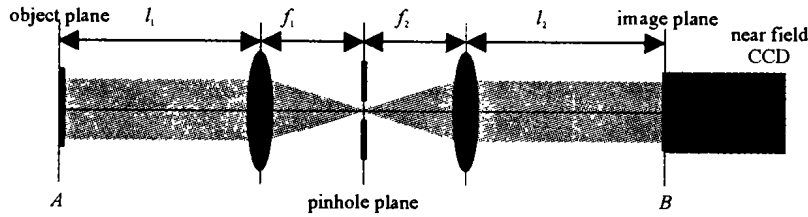


Fig. 2 Image relaying of near field

图 2 近场像传递示意图

根据矩阵光学<sup>[6~8]</sup>可以得到从 A 面到 B 面的光线矩阵

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_1 + f_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -M & -Ml_1 - \frac{l_2}{M} + f_1 + f_2 \\ 0 & -1/M \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中  $M=f_2/f_1$ 。由于 A 面和 B 面满足几何光学成像关系,故

$$-Ml_1 - \frac{l_2}{M} + f_1 + f_2 = 0 \quad (2)$$

由此

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -M & 0 \\ 0 & -1/M \end{pmatrix} \quad (3)$$

A 面上的一根光线轨迹可表示为

$$\begin{pmatrix} r_A \\ \theta_A \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中:  $r$  为光线起始点到光轴的垂直距离;  $\theta$  为光线出射方向与光轴的夹角。则这根光线在近场观察面 B 面上表示为

$$\begin{pmatrix} r_B \\ \theta_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_A \\ \theta_A \end{pmatrix} \quad (5)$$

因此

$$\begin{pmatrix} r_B \\ \theta_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Mr_A \\ -\theta_A/M \end{pmatrix} \quad (6)$$

由于近场 CCD 摄像机只能监视 B 面横截面的光强,所以只能探测光线的位置,由式(6)可以看出,B 面的位置和 A 面的位置成线性关系,近场 CCD 可以用来监视光束的位置平移。

同理,按照图 3 所示远场像传递示意图,光路与图 2 基本相同,主要区别在于小孔面为物面,而 B 面为小孔面的像平面,也是远场 CCD 探测面,  $f_2$  为第 2 个透镜的焦距。

由于小孔面和 B 面满足几何光学成像关系,A 面上的一根光线轨迹在远场观察面 B 面上可表示为

$$\begin{pmatrix} r_B \\ \theta_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{f_1 l_2 \theta_A}{d} \\ \frac{d}{f_1 l_2} r_A - \frac{f_1 \theta_A}{f_2} - \frac{d}{l_2} \left(1 - \frac{l_1}{f_1}\right) \theta_A \end{pmatrix} \quad (7)$$

从式(7)可以看出,在满足几何光学像传递的条件下,远场 CCD 摄像机在 B 面探测到的光线的位置变化量和 A 面光线的角移成线性关系,这样就可以利用远场监视来调整光束的角度漂移。

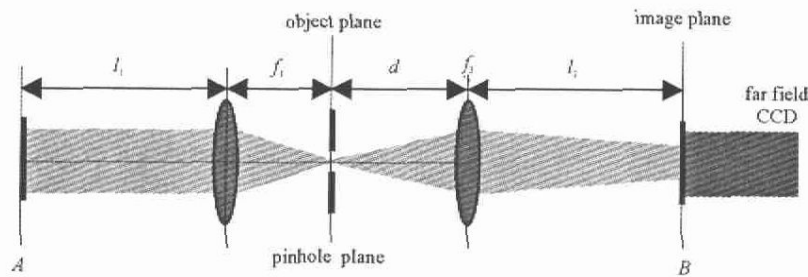


Fig. 3 Image relaying of far field

图 3 远场像传递示意图

### 3 腔镜的准直调整

NIF 装置采用插入式光纤点光源来调整腔镜<sup>[9,10]</sup>,它以光纤点光源作为参考基准,需要精密复位机构,要考虑光纤穿入空间滤波器的真空壁而不破坏其密封性,而空间滤波器里面的光纤头很容易被杂散的高功率激光损伤。本文设计的小孔像传递的腔镜准直方法有效避免了上述问题的发生。

多程放大器空间滤波器小孔板上的小孔一般都大小相等,其圆心位置呈对称分布,如图 4 所示。我们以小孔 1 和小孔 2 为例来说明腔镜 CM 的准直调整方法。在小孔 1 前面插入负透镜 OM 发散入射的激光束,这样激光完全照亮并充满小孔 1。按照前面小孔像传递原理,如果腔镜 CM 位置不准确,则在远场成像面 CCDF 上得到一个不完整的小孔像,如图 5(a)所示;反之,如果腔镜 CM 位置准确,小孔 1 的像应该正好完全通过小孔 2,通过成像透镜在 CCDF 上得到一个完整的小孔像,即理想情况的小孔像,如图 5(b)所示。这样,通过 CCDF 可以监视 CM 的位置,如果有偏移,可以通过调整腔镜 CM 上的步进电机,使得小孔像完整,达到理想情况,则腔镜 CM 的准直调整完成。

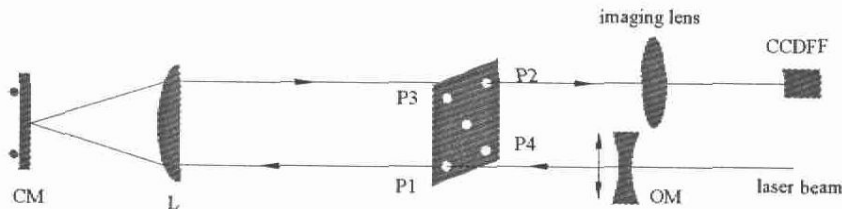


Fig. 4 Alignment of cavity mirror

图 4 腔镜的准直调整



(a) before aligning cavity mirror

(b) after aligning cavity mirror

Fig. 5 Images of CCDF before and after aligning cavity mirror

图 5 腔镜准直前和准直后远场 CCDF 图像

## 4 实验研究

### 4.1 方案设计

基于上述原理,针对 SG-III 原型装置的 4 程放大光路<sup>[11]</sup>,按照原型装置一半的比例设计了原型 4 程放大模拟平台,其光路自动准直系统布局如图 6 所示。总体准直方案是:设置 2 对近、远场监测点,先调整腔镜 CM,再同时准直 1,2 程光路,最后准直 3,4 程光路。具体调整步骤如下。

利用前面所述的腔镜调整方法来调整腔镜 CM;在反射镜 IM1 后设置近场监测点 CCDF12(IM1 为近场像传递面),和反转镜 BM2 后的远场 CCDF12 配合,检测近、远场误差信号,由计算机控制一对反射镜 IM0 和 IM1 转动,使注入光束准确穿过小孔 1 和小孔 2。此时,1,2 程光路便完成准直调整;在反转镜 BM3 后面设置

近场监测点 CCDNF34(BM3 为近场像传递面),在反射镜 TM1 后面设置远场监测点 CCDF34,取传输空间滤波器(The Vacuum Spatial Filter-2)的小孔中心为远场的基准中心,反转镜 BM3 为近场基准中心,调整反转镜 BM2 和 BM3 使光束正确穿过小孔 3 和小孔 4。

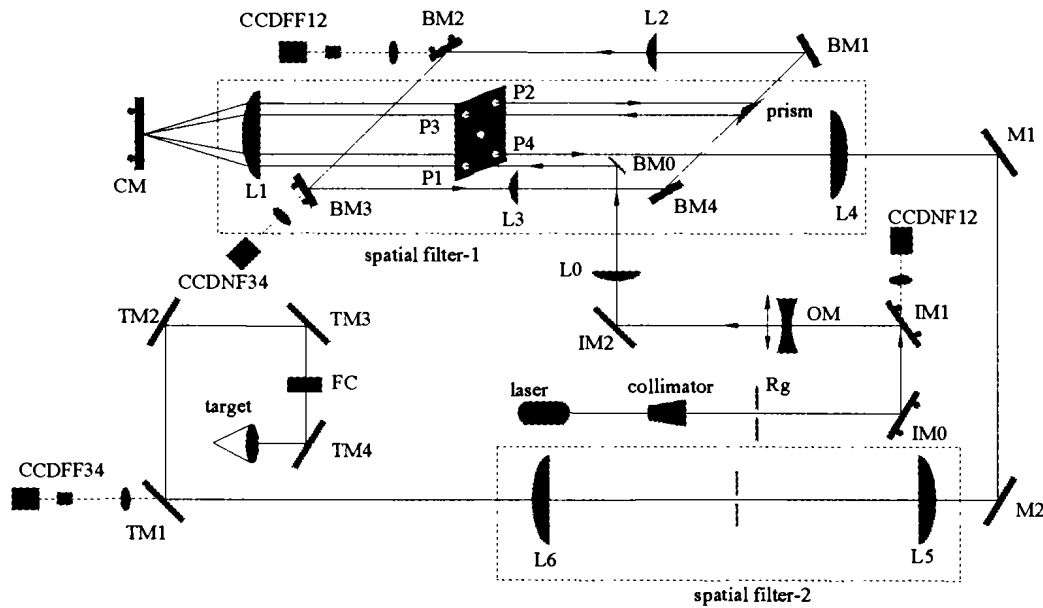


Fig. 6 Simulation experiment system of four-pass amplifier in the SG-III facility

图 6 原型装置 4 程放大模拟实验平台

4.2 实验结果

该方案在原型装置 4 程放大模拟实验平台上顺利实现,并且获得满意的实验结果。为考核光路准直调整的重复性,每隔 30min 时作一次准直操作,图 7 给出连续 10 次准直远场 CCDF34 的结果(光束指向)。图中▲是准直前有偏差的远场点,■是准直的参考基准,●是自动准直后修正的远场位置。实验结果表明:自动准直系统能够在 15min 之内顺利完成主放大级系统的光路调整,调整误差在 3 个像素以内,光束近场调整精度值小于近场光斑直径的 0.5%,光束远场调整精度小于或等于 0.3"(均根据所用商业 CCD 的像素精度推算得到),均达到了预定的总体准直调整要求。

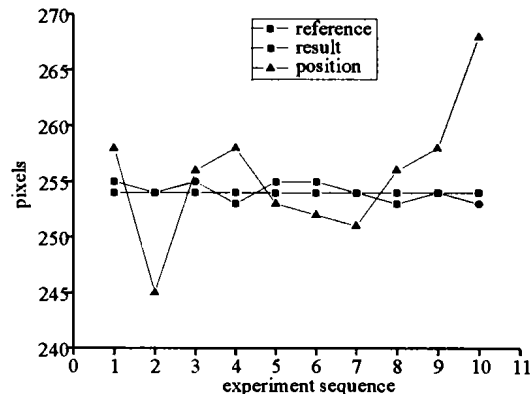


Fig. 7 Distribution curve on experiment results of far field alignment

图 7 光束远场(指向)准直结果分布曲线

5 结 论

本文充分考虑了高功率激光装置的多程放大器结构,分析了其主空间滤波器的小孔空间分布和总体光路的特点,利用小孔像传递和光路自动准直原理,设计出一套优化合理的多程放大腔镜准直方案,并在 SG-III 原型装置 4 程放大模拟实验平台上作了实验考核,得到了满意的结果。

参考文献:

[1] Paisner J A, Boyes J D, Kumpan S A. Conceptual design of the national ignition facility[A]. Proc of SPIE [C]. 1995, 2633; 2—12.  
 [2] Hunt J T, Glate J A, Simmons W W. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. Appl Opt, 1978, 17(13): 2053—2057.  
 [3] Hunt J T, Renard P A, Simmons W W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spital filters[J]. Appl Opt, 1977, 16(4): 779—782.  
 [4] 陈庆浩, 徐仁芳, 彭增云, 等. 用于激光核聚变装置的光路自动准直[J]. 光学学报, 1995, 15(5): 531—533. (Chen Q H, Xu R F, Peng Z Y, et al. Automatic optical alignment for laser fusion facility. Acta Optica Sinica, 1995, 15(5): 531—533)

- [5] Arsdall P J, Holloway F W, McGuigan D L, et al. Nova laser alignment control system[A]. Proc of SPIE[C]. 1984, **483**,54—64
- [6] 范滇元. 用光线矩阵元表达的非涅耳数[J]. 光学学报, 1983, **3**(4):319—325. (Fan D Y. The Fresnel number in terms of ray matrix elements. *Acta Optica Sinica*, 1983, **3**(4):319—325)
- [7] 范滇元. 用光线矩阵元表达的光学传递函数[J]. 光学学报, 1981, **1**(5):395—400. (Fan D Y. Optical transfer function in terms of ray matrix elements. *Acta Optica Sinica*, 1981, **1**(5):395—400)
- [8] 王绍民, 赵道木. 矩阵光学原理[M]. 杭州: 杭州大学出版社, 1994. (Wang S M, Zhao D M. Principles of matrix optics. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1994)
- [9] Boege S J, Bliss E S, Choccol C J, et al. NIF pointing and centering systems and target alignment using 351nm laser source[A]. Proc of SPIE [C]. 1997, **3047**:248—259
- [10] Holdener F R, Ables E, Bliss E S, et al. Beam control and diagnostic functions in the NIF transport spatial filter[A]. Proc of SPIE[C]. 1997, **3047**:692—699
- [11] 张彬, 吕百达. 高功率激光多程放大系统光束传输的计算分析[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(3):343—346. (Zhang B, Lü B D. Numerical analysis of high-power laser beams passing through a multipass amplifier system. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(3): 343—346)
- [12] 刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4程放大光路自动准直系统研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(5):582—586. (Liu D Z, Zhu J Q, Xu R F, et al. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(5):582—586)

## Study of cavity mirror alignment in multi-pass amplifier

LIU Dai-zhong, XU Ren-fang, FAN Dian-yuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences,

National Laboratory on High Power Laser and Physics, P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Alignment accuracy of the cavity mirror in multi-pass amplifier is very high. Aiming at the requirements on alignment precision of cavity mirror in high power lasers, using image relaying of pinholes and the principle of beam automatic alignment, a scheme to align the cavity mirror is designed. It has been demonstrated on the simulation experiment system of the SG-III prototype facility. The main amplifier's adjustment can be finished in 15min. The centering precision of the system is less than 0.5% of the beam diameter. The pointing precision of the system are less than 0.3".

**Key words:** Laser technique; Automatic alignment; Image relaying; Multi-pass amplifier