

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0409-03

# 光纤技术在光路自动准直中的应用

刘代中, 陈庆灏, 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** 光路自动准直系统用于惯性约束聚变的高功率激光装置的光束精密自动准直调整。针对神光Ⅲ原型装置四程放大光路对自动准直系统的调整时间和调整精度的要求, 考虑到光路总体结构的要求, 利用光纤像传递和光纤耦合技术, 结合近场远场像传递原理, 使用插入式光纤点光源实现了后腔镜的准直调整, 充分考虑了四程放大的光路像传递特点, 设计出一套优化合理的四程放大准直方案, 并且在神光Ⅲ原型装置模拟实验平台上得到了充分的验证和考核。实验结果表明光路自动准直系统能够在 15 min 之内顺利完成系统的光路调整, 光束近场调整精度优于近场光斑的 $\pm 0.5\%$ , 光束远场调整精度 $\leq \pm 0.3''$ , 满足了原型装置总体的要求。

**关键词** 激光技术; 自动准直; 光纤技术; 像传递; 四程放大

中图分类号 TN242

文献标识码 A

## Fiber Optics Applied to Beams Automatic Alignment System

LIU Dai-zhong, CHEN Qin-hao, XU Ren-fang, FAN Dian-yuan

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** The laser beams automatic alignment system is adjusting to adjust beam lines accurately in the high power laser facility for inertial confinement fusion. Considering the requirements on alignment time and alignment precision of the SG-III prototype facility, using techniques on image fiber and transmission fiber, combining the image relaying principle of near field and far field, innovating in cavity mirror adjustment by using inserted fiber light source, utilizing the characteristic of image relaying in four-pass amplifiers, a reasonable and optimized scheme for automatic aligning four-pass beam paths is presented. It has been demonstrated on the simulation experiment system of the SG-III prototype facility. Results indicate that beam paths adjustment can be finished in 15 minutes by the automatic alignment system. The precision of the near field adjustment was less than 0.5% of the spot. The accuracy of the far field adjustment was less than 0.3". Requirements of the SG-III prototype facility are met.

**Key words** laser technique, automatic alignment, fiber optics, image relaying, four-pass amplifier

## 1 引言

光路自动准直系统是惯性约束聚变的高功率激光装置的重要组成部分, 目前国内外的激光装置如美国的 NIF 装置、法国的 LMJ 激光装置、我国的神光Ⅲ原型装置, 其主光路的总体设计都采用多程放大方案, 以便充分提高主放大器的能量效率, 精简总体结构。这种多程光路结构显著不同于我国以往高功率激光装置所采用的直线型光路, 光束要在同一放大器中往复通过多次, 特别是要通过同一块反射镜(腔镜)反射并来回穿过空间滤波器的多个不同的小孔, 使得总体光路对腔镜的准直精度要求非常高, 而且总体结构不允许在腔镜后面取样采光, 空间滤波器空间狭小, 大大增加了自动准直的难度。

为了实现对这种复杂的多程光路的自动准直, 设计了一套优化合理的准直方案, 并且在神光Ⅲ原型装置模拟实验平台上得到了实验考核。

## 2 像传递原理

整个高功率激光装置中的像传递是指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, 从而使强度调制增长在原始输入分布的像面上复位到零, 以达到完善光束质量的目的。光路自动准直系统充分利用了装置的这种光路特点, 按照像传递来建立近场和远场探测系统。

大型高功率激光核聚变装置中主要的光学成像

**基金项目:** 国家 863 计划项目资助课题(2002AA845090)。

**作者简介:** 刘代中(1973-), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事高功率激光装置的光束自动准直研究工作。E-mail: dzliu@mail.shcnc.ac.cn

系统是空间滤波器,其成像作用早有论证<sup>[1,2]</sup>,只需考虑一级空间滤波器。如图1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。

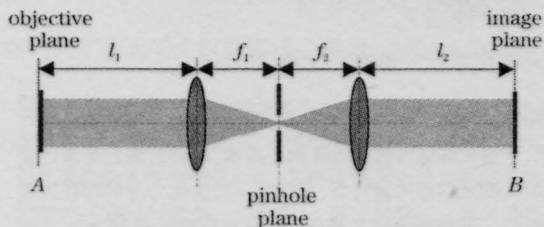


图1 近场像传递示意图

Fig.1 Image relaying of near field

根据矩阵光学<sup>[2,3]</sup>可以得到从A面到B面的光线矩阵:

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

$$\begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -M & -Ml_1 - \frac{l_2}{M} + f_1 + f_2 \\ 0 & -1/M \end{pmatrix}$$

其中

$$M = f_2/f_1 \quad (2)$$

由于A面和B面满足几何光学成像关系,故

$$-Ml_1 - \frac{l_2}{M} + f_1 + f_2 = 0 \quad (3)$$

由此,A,B面上一根光线轨迹可表示为(r,θ),则

$$\begin{pmatrix} r_B \\ \theta_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -Mr_A \\ -\theta_A/M \end{pmatrix} \quad (4)$$

由于近场 CCD 摄像机只能监视光束的横截面,所以只有光线的位置信息有意义,由式(4)可以看出,近场可以用来监视光束的位置平移。

同理,按照图2所示远场像传递示意图,B面为小孔面(Pinhole plane)的像面,可得到远场光线轨迹方程(5)。

$$\begin{pmatrix} r_B \\ \theta_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{fl_2}{d}\theta_A \\ \frac{d}{fl_2}r_A - \frac{f_1}{f_2}\theta_A - \frac{d}{l_2}\left(1 - \frac{l_1}{f_1}\right)\theta_A \end{pmatrix} \quad (5)$$

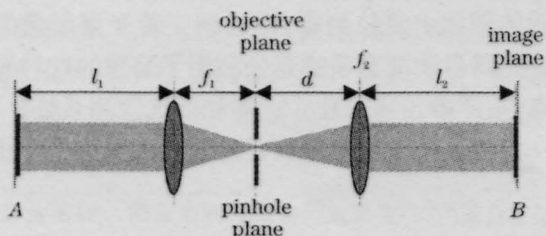


图2 远场像传递示意图

Fig.2 Image relaying of far field

从式(5)可以看出在满足几何光学像传递的条件下,远场 CCD 摄像机探测到的光线的位置变化和光线的角移成线性关系,这样就可以利用远场监视和调整光束的角度漂移。

### 3 光路自动准直

对于一个已先期调整好的激光系统,元器件的位置均已固定,但由于温度变化、反射镜机械结构蠕变、地基和支撑框架微振动、振荡器输出光束方向漂移和其他随机因素的影响,造成光束偏离原定光路。因此在激光装置新的发射前需要重新校正。光路自动准直的任务就是通过逐段检测光束位置和方向的误差,反馈控制一对反射镜,使光束恢复到原定光路上<sup>[4]</sup>。这样逐段由前向后依次调整,直至靶点。光路自动准直是个闭环系统,CCD 近远场摄像机探测光束位置,经图像卡将 TV 模拟信号转换成数字信号送入计算机。由计算机图像处理<sup>[5,6]</sup>,求出实时图像中心和标准中心的误差信号 Δx 和 Δy,此误差信号放大后推动伺服反射镜的步进马达,使光束恢复到原来的位置。

### 4 光纤技术

光纤体积小,使用灵活,在空间狭小的高功率激光装置中得到广泛应用如美国的 NIF 装置<sup>[7,8]</sup>。神光 III 原型装置的主放大器采用四程放大结构,光束要在放大器中往复通过四次,特别是要通过同一块反射镜(腔镜)反射并来回穿过空间滤波器的四个不同的小孔,使得总体光路对腔镜的准直精度要求非常高,空间滤波器空间狭小,大大增加了自动准直的难度。为了实现这种复杂的多程光路的自动准直,特别是腔镜的调整,在光路自动准直系统中利用光纤传像束,结合像传递原理,使用插入式光纤点光源实现了腔镜的准直调整。

图3为光纤调整腔镜示意图,其中 P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>,P<sub>3</sub>和 P<sub>4</sub>是主放大器的空间滤波器的四个小孔,P<sub>5</sub>是准直小孔,P<sub>6</sub>孔放置传输光纤传送的点光源,P<sub>7</sub>孔放置光纤传像束的输入端,P<sub>6</sub>孔和 P<sub>7</sub>孔

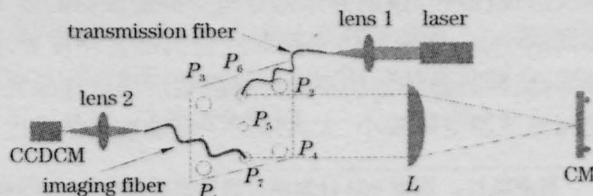


图3 光纤调整腔镜图

Fig.3 Using fiber light source to align the cavity mirror

是  $P_6$  孔的像面。

利用  $1.064\mu\text{m}$  半导体激光器作光源,通过透镜 1 耦合到单模传输光纤并传送到小孔板上的  $P_6$  位置,作为点光源固定在小孔板上,此点光源通过透镜  $L$  和腔镜 CM 重新成像到  $P_7$  孔即光纤传像束输入面,然后光纤传像束把点光源的像传递到空间滤波器外面的成像透镜 2 前面,最后成像到摄像机 CCDCM 上,这样可以通过监视光纤点光源的位置来精确调整腔镜。

### 5 系统方案设计

基于上述原理和技术,针对神光 III 原型装置的四程放大光路,按照原型装置一半的比例设计了原型四程放大模拟平台,其光路自动准直系统布局如图 4 所示:半导体激光器的出射光经平行光管扩束,经过光阑  $R_g$  整形为  $\phi 35\text{ mm}$  的圆光斑,然后通过透镜  $L_0$  会聚,在小孔 1 面处聚焦注入,穿过小孔 1 后再由透镜  $L_1$  准直为平行光;经腔镜 CM 反射,再由  $L_1$  会聚,穿过小孔 2,通过三棱镜射向“反转镜”BM1;经透镜  $L_2$  准直为平行光,再通过“反转镜”BM2 和 BM3,在透镜  $L_3$  焦面上穿过小孔 3;经  $L_1$  准直后,再一次经腔镜 CM 反射,然后经  $L_1$  进入滤波器,穿过小孔 4,最后通过透镜  $L_4$  以平行光出射。光路准直的难点在于:1)空间滤波器内空间狭小,不能在其中取样,腔镜后也不允许取样;2)腔镜的方位是唯一的,若不准确,则无论如何调整其它反射镜也不能实现全光路准直。该方案的主要特色是解决了腔镜准直这一棘手难题,可以方便的实现腔镜的准确准直,而不需在主光路加任何特殊组件,通过两对近、远场监测点就可实现 1,2 程和 3,4 程的准直,解决了腔镜后不能取光给准直带来的困难。

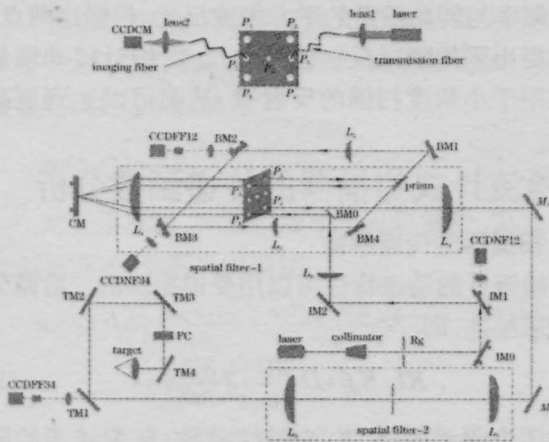


图 4 原型装置四程放大模拟实验平台

Fig.4 Simulation experiment system of four-pass amplifier in the SG-III prototype facility

### 6 实验结果

该方案在原型装置四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。实验表明: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,光束近场调整精度优于近场光斑的  $\pm 0.5\%$ ,光束远场调整精度  $\leq \pm 0.3''$ 。为考核光路准直的重复性,每隔半小时作一次准直操作,图 5 示出连续 10 次准直远场 CCDFF34 的结果(光束指向)。图中三角形点是准直前有偏差的远场点,矩形点是准直的参考基准,圆点是自动准直后修正的远场位置,均达到了预定的总体调整要求。

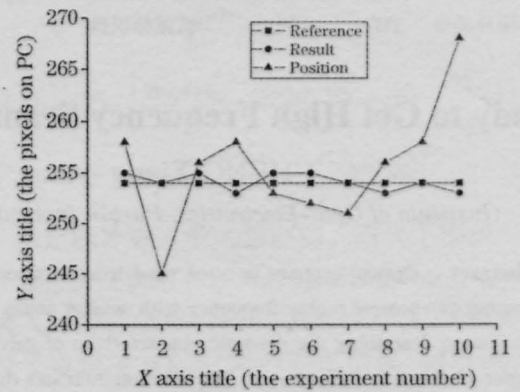


图 5 光束远场(指向)准直结果分布曲线

Fig.5 Distribution curve on experiment results of far field alignment

### 参考文献

- 1 J. T. Hunt, J. A. Glate, W. W. Simmons. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging [J]. *Appl. Opt.*, 1978, 17(13):2053-2057
- 2 Fan Dianyuan. The Fresnel number in terms of ray matrix elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 1983, 3(4):319-325  
范滇元. 用光线矩阵元表达的菲涅耳数[J]. *光学学报*, 1983, 3(4):319-325
- 3 Fan Dianyuan. Optical transfer function in terms of ray matrix elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, 1(5):395-400  
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
- 4 ChenQinhao, Xu Renfang, Peng Zengyun et al. Automatic optical alignment for laser-fusion facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(5):531-533  
陈庆灏,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
- 5 C. D. Swift, E. S. Bliss, W. A. Jones et al. Target plane imaging system for the Nova laser [C]. *SPIE*, 1986, 608:2-8
- 6 P. J. Arsdall, R. J. Reeves. Image processing for automatic alignment in the Nova laser facility [C]. *SPIE*, 1986, 608:29-39
- 7 S. J. Boege, E. S. Bliss, C. J. Choccol et al. NIF pointing and centering systems and target alignment using 351nm laser source [C]. *SPIE*, 1997, 3047:248-259
- 8 F. R. Holdener, E. Ables, E. S. Bliss et al. Beam control and diagnostic functions in the NIF transport spatial filter [C]. *SPIE*, 1997, 3047:692-699