

# 激光核聚变装置中基于像传递的 激光自动准直技术研究\*

何 为 陈庆浩 徐仁芳 彭增云 杨惠兵 诸彩龙 赵继然  
(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 基于像传递的激光自动准直技术是提高准直准确度、增加稳定性的好方法。本文在理论上用二维快速傅里叶变换(FFT)分析了准直中基于像传递的近远场信号对图像处理影响;在光束近远场像面上引入十字叉丝,并以“神光”装置的某一级空间滤波器为例,计算出光束直径一定时合适的十字叉丝尺寸;最后通过实验确定了基于像传递的自动准直技术的具体实现系统。

**关键词** 像传递, 自动准直, 空间滤波器。

## 1 引 言

激光束的光路自动准直是激光核聚变装置每次打靶前必须运行的重要环节。因为这类装置的光路很长,种子光从振荡器输出后,还需经过前置放大器和主放大器,才能到达靶丸上,前端光束的微小漂移会在传输过程中被放大;另一方面主放大器一般有好几路,甚至上百路,这若干路光需会聚在仅为几十微米的靶上。所以快速、准确地自动调整系统是整个装置正常工作的有力保证。

光路自动准直系统一般在光路以外设置光学系统和 CCD 像机监视光束的位置,在近场监视光束的平移,在远场监视光束的角移。工作时计算机采集近远场的摄像机信号,经过一系列的图像处理,找到被调整光束的中心误差,根据这一误差驱动连接反射镜上的马达调整光轴的位置,直至误差小于一个像素。目前,国际上已有的激光核聚变装置(NOVA,大坂“XII”,“神光”装置)都以这种方式运行<sup>[1-3]</sup>。

为了达到点火条件,激光核聚变装置朝着光路更长更多、打靶精度更高的方向发展,使自动准直系统面临新的挑战。以最先进的将在下一世纪初建成的美国国家点火装置(NIF)为例,它共有 192 路,每一路长达 200 m 左右,它的准直采用了全新的设计概念<sup>[4]</sup>,准直精度达到 0.6  $\mu\text{rad}$ 。在“神光”装置中,我们在原有的自动准直系统基础上作了新的探索,主要是尝试将像传递加入到准直中去。整个激光核聚变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,从而使强度噪声的增长在原始输入分布的像面上复位到零,以达到改善光束质量

\* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期:1998-05-14; 收到修改稿日期:1998-07-13

的目的。自动准直系统中运用像传递是指在振荡器输出口的某一特定位置上引入一个定向实物作为系统最初始的物，此物被各级空间滤波器逐级传递，重新成像在近场 CCD 的光敏面上。从以下的分析可以看出基于像传递的近远场信号的采集可以提高自动准直的精度。

## 2 像传递支持高精度的自动准直

大型高功率激光核聚变装置中，空间滤波器的成像作用无论是从几何光学<sup>[5]</sup>，还是从物理光学<sup>[6]</sup>的角度，都已经有了完善的理论解释。空间滤波器是由一对共焦的透镜组成，在共焦面处有一针孔，

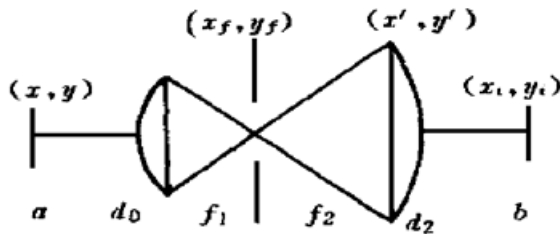


Fig. 1 Spatial filter

如图 1 所示。设  $a$  面为前端传来的像传递的中继面，在此级空间滤波器中可以看成一物面，它距第一块透镜距离为  $d_0$ ，光场分布为  $U(x, y)$ ；小孔面是远场 CCD 的观察面，由傅里叶光学<sup>[7]</sup>可知小孔面(焦平面)的光场复振幅(远场)分布为：

$$U'_f(x_f, y_f) = \frac{1}{j\lambda f_1} \exp \left[ j \frac{k}{2f_1} \left( 1 - \frac{d_0}{f_1} \right) (x_f^2 + y_f^2) \right] \times \mathcal{F} \left\{ U(x, y) \right\} \text{cir} \left( \frac{\sqrt{x_f^2 + y_f^2}}{r_0} \right) \quad (1)$$

$f_1$  为第一块透镜的焦距， $r_0$  为小孔的直径。同样， $b$  面为近场 CCD 的观察面，它距第二块透镜的距离为  $d_1$ ， $b$  面近场光场复振幅分布  $U_i(x_i, y_i)$  为：

$$\begin{aligned} U_i(x_i, y_i) &= \frac{1}{\lambda^2 f_2 d_1} \exp \left[ j \frac{k}{2d_1} (x_i^2 + y_i^2) \right] \iiint_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U'_f(x_f, y_f) \exp \left[ j \frac{k}{2} \left( \frac{1}{f_2} + \frac{1}{d_1} - \frac{1}{f_2} \right) (x^2 + y^2) \right] \times \\ &\quad \exp \left[ j \frac{k}{2f_2} (x_f^2 + y_f^2) \right] \exp \left[ - j \frac{2\pi}{\lambda f_2} (x_f x' + y_f y') \right] \exp \left[ - j \frac{2\pi}{\lambda d_1} (x' x_i + y' y_i) \right] \times \\ &\quad dx' dy' dx_f dy_f \\ &= \frac{1}{j\lambda^3 f_1 f_2 d_1} \exp \left[ j \frac{\pi}{\lambda d_1} (x_i^2 + y_i^2) \right] \mathcal{F} \left( \mathcal{F} \left\{ \text{cir} \left( \frac{\sqrt{x_f^2 + y_f^2}}{r_0} \right) \right\} \times \right. \\ &\quad \left. \exp \left[ j \frac{\pi}{\lambda} \left( \frac{1}{f_1} - \frac{d_0}{f_1^2} + \frac{1}{f_2} \right) (x_f^2 + y_f^2) \right] \mathcal{F} U(x, y) \right) \exp \left( j \frac{\pi}{\lambda d_1} (x_i^2 + y_i^2) \right) \quad (2) \end{aligned}$$

在准直过程中为了便于定向和图像处理，在物面上插入一个定向实物作为近场 CCD 的原始物光场的调制。如果插入的定向实物是一个宽  $w_1$ 、长  $w_2$  的十字叉丝，传播的光束是口径为  $R$ 、振幅为  $A$  的单色平面波，那么  $a$  面的光场可以具体表示为：

$$U(x, y) = A \left[ \text{rect} \left( \frac{x}{w_1}, \frac{y}{w_2} \right) + \text{rect} \left( \frac{x}{w_2}, \frac{y}{w_1} \right) - \text{rect} \left( \frac{x}{w_1}, \frac{y}{w_1} \right) \right] \text{cir} \left( \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R} \right) \quad (3)$$

在神光装置的某一级空间滤波器中： $R = 63 \text{ mm}$ ， $f_1 = 2404.8 \text{ mm}$ ， $f_2 = 3372.50 \text{ mm}$ ， $r_0 = 643 \text{ } \mu\text{m}$  (7 倍衍射极限，脉冲宽度 1 ns 时)，通过二维傅里叶变换可以计算出光场的近、远场的分布。

图像处理程序由定阈值、中值滤波、边缘定义、求质心等几部分组成，调整精度和图像处理的精度密切相关。由于边缘定义是图像处理的关键，所以图像的边缘质量是决定图像处理精度的首要因素。变化激烈的边缘包含很多离散噪声，会降低处理结果的精度。根据计算

结果：当近场观察面位于像面上，所得到的叉丝像边缘要整齐些，强度分布也基本均匀；当偏离像面较小时，所得到的叉丝像边缘毛刺增多，强度变化激烈；当偏离像面很大时，所得的叉丝形状畸变得很厉害，趋于远场的图像，如图 2 所示。因此将近场 CCD 放置在像面上对图像处理是有利的。另一方面，我们也发现，即使是将近场观察面放置在像面上，不同宽度的叉丝的成像质量也是不一样的。在叉丝的宽度很细时，小孔对成像的影响较大，叉丝像的宽度会有起伏；随着叉丝宽度增大，这种影响逐渐变小，成像质量趋于稳定。如图 3 所示。宽度大的叉丝像边缘质量优于宽度小的叉丝，但当叉丝宽度大于 8 mm 时，边缘的改善并不十分明显。

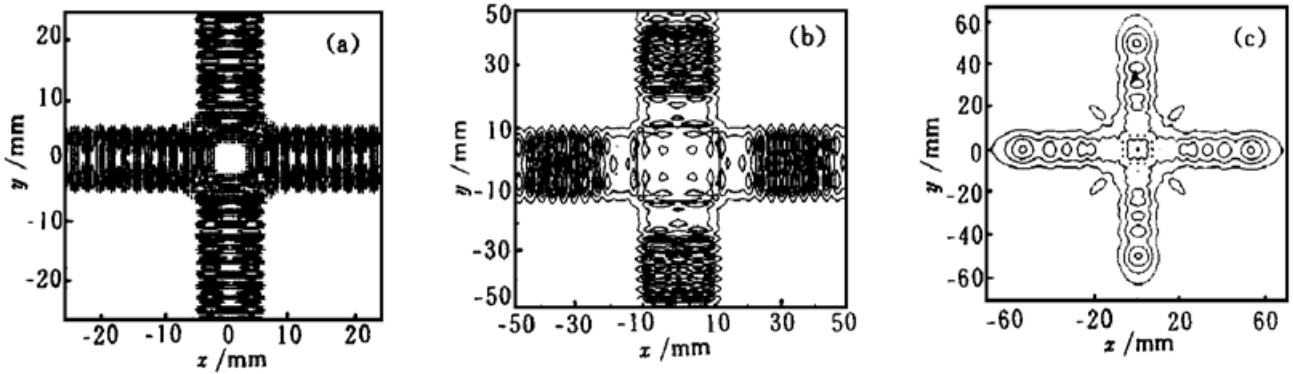


Fig. 2 When  $d_0 = 3$  m,  $w_1 = 8$  mm, imaging performances differ in different  $b$  planes. (a) In image plane, (b) Deviate from image plane 0.5 m, (c) Deviate from image plane 190 m

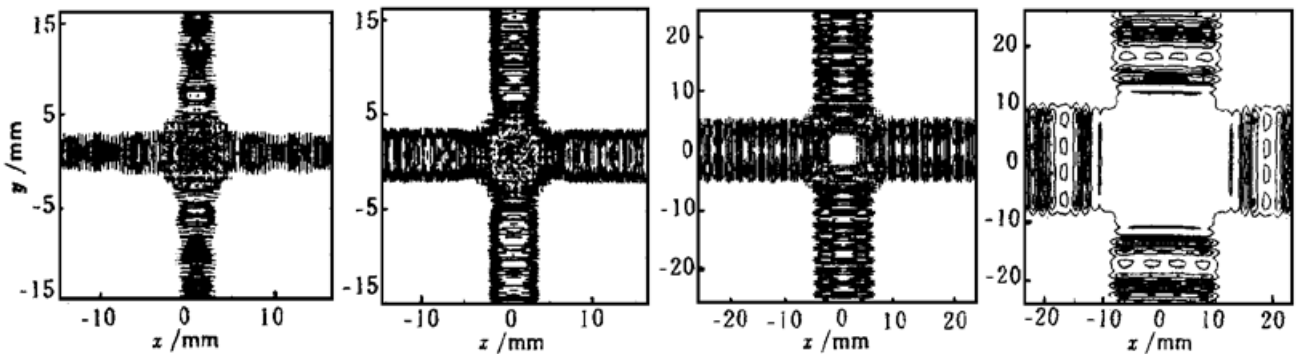


Fig. 3 Near-field images of different cross-hair widths:  $w_1 = 1, 4, 8, 15$  mm. The cross-hair's width is wider, its image's edge is tidier

在远场观察到的实际上是十字叉丝在相干光照明下的空间谱，而空间谱的特性决定远场信号的边缘质量是很好的。但是由于图像处理程序只能对封闭光斑求质心，所以需要通过定阈值来滤去+ 1、- 1级和其他更高级次的光斑。因此对远场更关心的是中央级和+ 1、- 1级的亮度差，希望能尽量集中在中央级，中央零级的亮度和+ 1、- 1级的亮度差别越大越好。由表 1 中所列的归一化亮度值中可知叉丝宽度越细，中央零级和+ 1、- 1级的亮度差别越大。在叉丝宽度小于 10 mm 时，中央级的边缘亮度和+ 1、- 1级相差 1 倍以上，是利于远场处理的。

根据以上的分析，近、远场对叉丝宽度的处理要求是相互矛盾的，所以在选择叉丝大小上应兼顾近、远场的要求。例如对于文中举例的这一特定的空间滤波器来说，适宜的叉丝宽度在 8~ 10 mm 之间。

Table 1. Central intensity of different crosshair widths

crosshair width /mm	zero order minimum Intensity (normalized)	first order maximum Intensity (normalized)
4	0.0021	
8	0.0157	0.0098
10	0.0119	0.0092
14	0.0023	0.0088
18	0.0040	0.0062
26	0.0040	0.0057
28	0.0011	0.0034

### 3 基于像传递的准直实验装置和结果

为了验证这一方法，作者进行了判断实验。实验装置如图 4 所示。将 Nd:YLF 单脉冲激光

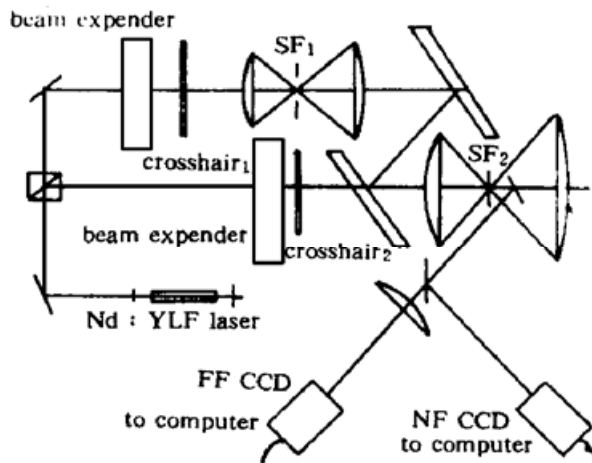


Fig. 4 Experimental system of image-based alignment technique

激光器输出的光束用半透半反棱镜分为两路，每一路输出直径 2 mm、能量 5 mJ 的平行光，扩束后为两级空间滤波器提供准直光源。在第一个十字叉丝经过二级空间滤波器后与第二个叉丝经过一级空间滤波器后均成像在近场 CCD 像机的光敏面上。叉丝 2 提供本地参考实物，叉丝 1 提供被准直的定向实物。光路手工调整后，近远场 CCD 先获取叉丝 2 的光斑信息，调用图像处理程序找到光斑质心，记录后作为调整的参考中心，再用近远场 CCD 获取叉丝 1 的近远场光斑信息，求得中心，根据它们和参考值的误差，调整两块平行反射镜，直到近远场误差小于 2 个像素。表 2 列出了调整前后光斑的像素坐标。实验

结果得到的光束调整精度小于光束直径的 1%。

Table 2. Experimental data

crosshair centroid/pixel	near-field	far-field
reference	(240, 189)	(387, 241)
before alignment	(328, 188)	(281, 223)
after alignment	(241, 190)	(388, 241)

实验中由于近远场均放置在像传递的位置，图像处理的精度得到提高。从实验中可以看出像面处和偏离像面后的成像差别，如图 5 所示。

**结 论** 通过对基于像传递的激光自动准直技术的理论分析和判断实验，我们认为这是一种提高准直准确度和增加准直稳定性的好方法，可以运用到激光核聚变这种大型激光装置中去：在振荡器输出口的某一特定位置上引入一个十字叉丝(或液晶空间整形器)作为系统最初始的物，此物被各级空间滤波器逐级传递，最后成像在靶球上。激光准直用近场 CCD 对物在每一级空间滤波器的像面成像；远场 CCD 对每一级空间滤波器的小孔面成像。这样就把整个系统有机地联系起来，靶球也就可以成为激光准直的最终标准，解决了基准问题，提高了系

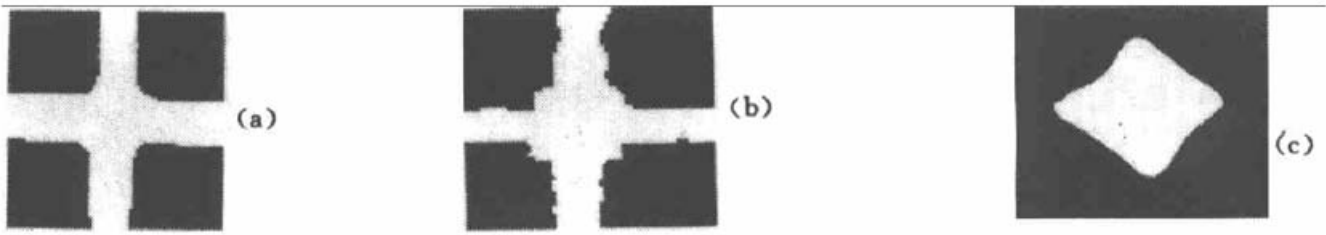


Fig. 5 Experimental picture. (a) Near-field picture (on image plane), (b) Near-field picture (deviate from image plane 15 mm), (c) Far-field picture (on image plane)

统的稳定性。而以往由于没有确定的基准, 准直的参考中心依靠振荡器的光束来确定, 影响了准直的稳定性和可靠性。另外, 在每一个像面处都引进一个大小合适永久性的定向实物和平行激光照明光源, 由此构成分布式的准直系统, 将光路分成若干段调整, 实现并联式的激光自动准直。这样的系统大大提高了整个装置的总体的调整速度, 而且调整精度也是很高的。

### 参 考 文 献

- [1] Paul J. Van Arsdall, Frederick W *et al.*. NOVA laser alignment control system. *Proc. SPIE*, 1984, **483**: 54~ 64
- [2] 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. *光学学报*, 1995, **15**(5): 531~ 535
- [3] 陈庆浩, 徐仁芳, 彭增云等. CCD 多路光束光路自动准直. *激光和光电子学进展*, 1996, **7**(增刊): 186 ~ 188
- [4] Boege S J, Bliss E S, Choccol C J *et al.*. NIF pointing and centering systems and target alignment using 351 nm laser source. *Proc. SPIE*, 1996, **3047**(97): 248~ 256
- [5] Hunt J T, Glaze J A, Simmons W W *et al.*. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging. *Appl. Opt.*, 1977, **17**(13): 2053~ 2058
- [6] 范滇元. 用光线矩阵元表达的菲涅耳耳数. *光学学报*, 1983, **3**(4): 319~ 325
- [7] 吕乃光. 傅里叶光学. 北京: 机械工业出版社, 1988. 98, 109

## Image Transfer Based Automatic Laser Alignment Technique for Laser-Fusion Facility

He Wei    Chen Qinghao    Xu Renfang    Peng Zengyun

Yang Huibing    Zhu Cailong    Zhao Jiran

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academia of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 14 May 1998; revised 13 July 1998)

**Abstract** The image transfer based automatic laser alignment technique is a good way for improving the alignment accuracy and increasing alignment stability. The effects of this technique on the image processing is analyzed theoretically by two dimension FFT simulation. The matched cross-hair width for one spatial filter in "Shengguang Facility" is calculated. A detailed image transfer based alignment system is given.

**Key words** image transfer, automatic alignment, spatial filter.