

4程放大光路自动准直系统研究^{*}

刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 范滇元

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

摘要: 激光束光路自动准直系统用于神光-III原型装置光束精密准直。针对神光-III原型的总体要求和主光路, 结合光路自动准直的关键技术, 充分考虑了其4程放大主空间滤波器的4个小孔空间分布和光学位置的特点, 利用小孔像传递的原理, 设计出一套优化、合理的4程放大的光路准直总体方案, 并且在多程放大实验平台上得到了充分的验证和考核。

关键词: 激光技术; 光束准直; 四程放大; 像传递

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A

激光核聚变装置是规模最大的一类激光系统, 如美国 NOVA 装置、国家点火装置(NIF), 日本 GEKKO-III, 中国“神光-II”装置等, 其中均包含大量激光器件、光学元件和组件, 光路总长度达到100m以上。为了确保系统每次运行时, 从振荡器发出的激光束能够稳定、精确地穿过预放大器、主放大器、倍频器、靶室, 并精确地照射到微型靶丸上, 激光装置均配置了光路自动准直系统。自动准直系统已成为大型激光装置必不可少的重要组成部分。

随着激光聚变技术的迅速发展, 光束口径和路数急剧增多, 光路长度和元器件数目成倍增长, 对光路自动准直的精度、速度和效率提出了越来越高的要求。光路准直技术也不断提高和发展。例如, 光束为192路的NIF装置其准直系统比诺瓦装置, 在设计概念上和实现技术上都有了很大的改变^[1,2], 光束远场准直精度已经达到了 $6\mu\text{m}$ ^[3](相当于 $0.6\mu\text{rad}$)。我国激光核聚变装置的自动准直系统虽比国外起步晚, 但经过十多年的摸索, 也积累了许多成功的经验并有自己的特色^[4]。为了适应新一代激光聚变装置对光束控制的要求, 我们针对神光-III原型装置的光路构形^[5], 特别是充分考虑了其4程放大光路的特点, 设计出一套优化合理的光路自动准直方案, 并在实际装置上进行了实验考核, 得到了满意的结果。自动准直系统能够在15min之内顺利完成光路调整, 光束的近场调整精度优于光斑的0.5%, 远场调整精度优于0.3"。特别是采用了与NIF不同的小步逼近控制程序, 调整时不需移开和复原系统的滤波小孔, 显著地简化了结构, 并提高了精度和效率。

1 光路自动准直的关键技术

对于一个已调整好的激光系统, 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它随机因素的影响, 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, 逐段由前向后依次调整, 直至靶点。为实现这一要求, 光路自动准直系统应包括如下几项关键技术: 选取调整光源和光路基准, 获取光束参数信息(含图像信号处理), 设计反馈控制程序及伺服执行机构等。

1.1 用于光路调整的光源

有两种可选方案: 以系统自身的振荡器为光源, 或另设一个专用的调整光源, 它们各有利弊。在本文工作中, 我们选用第一种方案, 它的优点是简单且避免了新光源耦合进系统所带来的误差。但激光发射的重复频率较低, 光强较弱, 光路误差信息的获取和信号处理需特别设计。

1.2 光路基准的选取

可以选择光路上相隔一定距离的两个光束中心点作基准, 依据“两点决定一条直线”的原理, 来复原光路。

* 收稿日期: 2003-05-13; 修订日期: 2004-02-02

基金项目: 国家863计划项目资助课题

作者简介: 刘代中(1973—), 男, 湖北荆门人, 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800-211信箱; E-mail: dzhliu@mail.shenc.ac.cn.

其精度取决于两点间的间距。为了保证足够的精度,距离越长越好,但有使用上的限制。为此,我们选择一个近场点和一个远场点,远场点等效于无穷远处点。近场基准点可选用光路上某个光学元件的几何中心(或已准直的光束近场图几何中心);而远场基准点则选用光路上空间滤波器的滤波小孔的几何中心(滤波小孔位于滤波器透镜的焦面)。以 CCD 为探测器,把这两个点记录下来,作为光路准直的“零点”。当被调整的光束近、远场中心与基准点偏离时,用误差信号反馈控制这段光路上的两块反射镜,使光束恢复通过基准点,实现光路的复原,从而达到光路准直的目的。

1.3 光束状态信息的获取

把实际光束通过该段光路时的状态提取出来并精确地确定其近、远场位置,这是光路自动准直的一个核心技术。首先要将被测光束从系统的主光路引导出来供 CCD 探测器测量。我们利用光路上反射镜后泄露出来的光束,并采用图 1 和图 2 所示的探测系统分别测量其近场和远场位置。

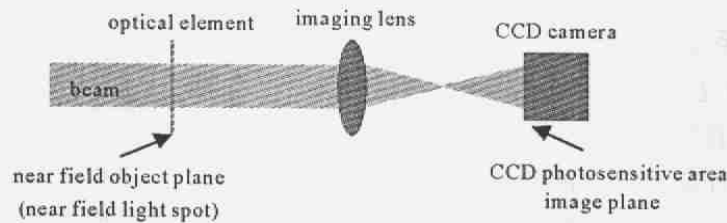


Fig. 1 Detection system of the near field beam

图 1 光束近场探测系统

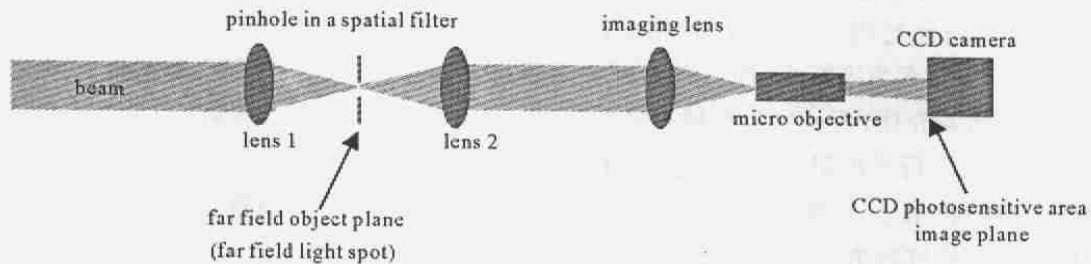


Fig. 2 Detection system of the far field beam

图 2 光束远场探测系统

在近场测量中,应把近场基准点位置成像到 CCD 的光敏面上(像传递结构),同时选取合适的像放大(缩小)倍率,使近场像的尺度与 CCD 光敏面孔径匹配,以保证光束近场中心的测量精度。我们采用的 CCD 面阵像素为 768×576 ,近场像占据的像素超过 200 个。在远场测量中,为精确测定光束焦斑的中心,需要用显微物镜把焦斑像放大到与 CCD 光敏面孔径匹配的尺度,占据 300 个像素。由此可推断近场中心的测量精度为光束直径的 0.5%,光束远场角精度为 $0.3''$ 。

为实现上述精度,需要对采集到的二维图像作特殊的计算机处理^[6]。采用文献[4,6]的方法,可以准确地确定图像的几何中心,如图 3 所示。图 3(a)为 CCD 采集到的原始图像;用二值法除去噪声后,如图 3(b)所示;再用中值法去除孤立点,如图 3(c)所示。以上操作消除了非正常光噪声带来的测量误差。在此基础上,选择一个合适的光强阈值作为光束图形的边缘轮廓,最后求其几何中心,如图 3(d)所示。求出被测光束的近、远场中心后,与事先标定的基准点位置比较,就得到了所需的误差信号。

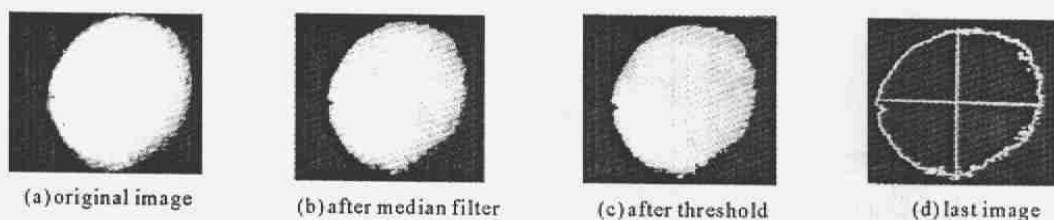


Fig. 3 CCD image process

图 3 CCD 图像处理

1.4 反馈控制程序

依据光束近、远场位置的误差信号,通过计算机反馈控制一对反射镜转动,最终使光束近远场和基准点重合。操作流程如图 4 所示。在闭环控制过程中,两块反射镜依次先后动作,往往发生前面一块反射镜转动后使

光束偏出滤波器小孔,从而阻断了光路,使控制无法继续。美国 NIF 装置的准直方案是先将滤波小孔移开光路,待光路准直完成后再复位。这种方案结构复杂,而且要求很高的复位精度。本文设计了小步、多次逼近的控制程序,克服了这一困难。不仅不需要移开小孔,而且利用激光系统原有光路的像传递结构,巧妙地解决了 4 程放大光路中“腔镜”的准直难题。

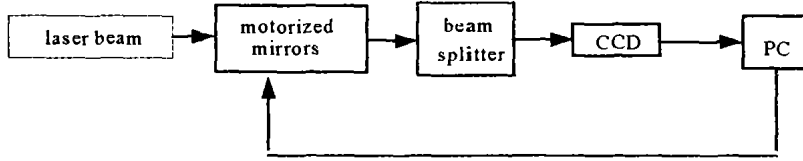


Fig. 4 Alignment close-loop

图 4 闭环准直系统

2 4 程放大光路自动准直系统设计

基于上述关键技术,针对神光-Ⅲ原型装置的 4 程大光路,设计了独特新颖的光路自动准直系统。

2.1 4 程放大的光路特点和准直难点

4 程放大激光系统是神光-Ⅲ装置的主要组成部分,其光路结构明显不同于以往高功率激光装置所采用的直线型光路^[7]。光束要在同一放大器中往复通过 4 次,特别是要通过同一块反射镜(腔镜 CM)反射并来回穿过空间滤波器的 4 个不同的小孔,大大增加了自动准直的难度。4 程放大光路布局如图 5 所示。

来自前级的光束首先通过透镜 L0 会聚,在小孔 1 面处聚焦,穿过小孔 1 后再由透镜 L1 准直为平行光,第 1 次通过增益介质放大;经过腔镜 CM 反射,第 2 次通过增益介质;再由 L1 会聚,穿过小孔 2,射向“反转镜”BM1, BM2;经透镜 L2 准直为平行光,通过电光开关后返回空间滤波器,在透镜 L2 焦面上穿过小孔 3;经 L1 准直后,第 3 次通过增益介质;再一次经腔镜 CM 反射,第 4 次通过增益介质;然后经 L1 进入滤波器,穿过小孔 4,最后通过透镜 L3 以平行光出射。光路准直的难点在于:布局上,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;技术上,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。因此,确定腔镜的准确方位是关键。

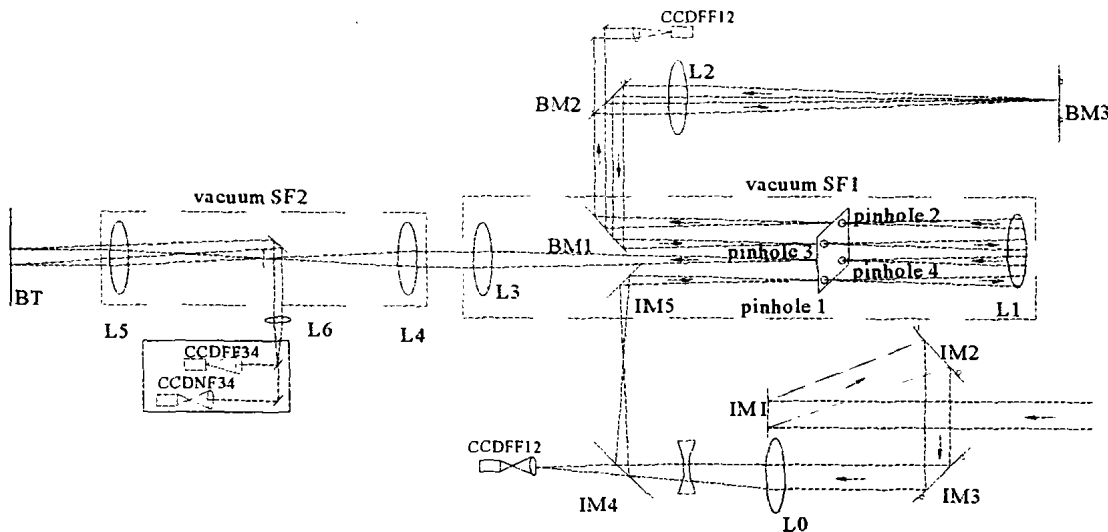


Fig. 5 Sketch of the four-pass amplifier system

图 5 4 放大光路布局图

2.2 4 放大光路自动准直方案

我们分析了 4 放大光路的特点,发现对自动准直起决定作用的是其多重像传递^[8,9]结构:(1)腔镜面在多程往返光路中自成像;(2)小孔板上小孔 1 和小孔 2 对称分布并共轭成像,小孔 3 和小孔 4 也互为共轭像面;(3)孔板平面和腔镜平面分别位于透镜 L1 的前后焦面。我们充分利用了像传递特点,设计出简单快速的光路自动准直方案。总体方案是:设置两对近、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。

在反转反射镜 BM2 后设置远场监测点 FF12,其接收面是穿过孔 2 的发散光束的焦面,取小孔 2 中心为远

场的基准中心；同时，这一焦面又必然是小孔 2 面的共轭成像面。由于孔 1 和孔 2 也共轭成像，所以小孔 1 的像将依次传递到 FF12 的远场监测面上。利用这些像传递关系，就可以在精确准直 1,2 程光路之前，先行调好腔镜 CM。为此，我们在反射镜 IM4 前插入可移动的负透镜 FM，用以产生照明小孔 1 的发散光源。在远场 CCD FF12 上可以检测小孔 1 的像是否准确位于小孔 2 处。图 6(a)显示腔镜未准直好，小孔 1 的像被小孔 2 不对称地截取。根据误差信号，控制腔镜 CM 的伺服电机运动，使孔 1 像准确地落到孔 2 中心。此时，在 CCD FF12 上显示一个对称圆整的图像，如图 6(b)所示，这表明腔镜已准直到位。

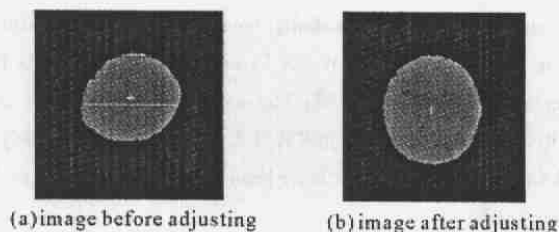


Fig. 6 Image of CCD FF12

图 6 CCD FF12 的图像

在 IM4 后设置近场监测点 NF12，和反转镜 BM2 后的远场 FF12 配合，检测近、远场误差信号，由计算机控制一对反射镜 IM2 和 IM3 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。对此，我们采用如下方法作进一步的校验：在光路中加黑白相间的方格纸，用 CCD 看小孔板，十字叉正好将小孔 4 等分；光路中不加任何物件，看小孔板两侧，无散射激光。这表明 1,2 程已确实穿过小孔 1 和 2。

在准直透镜 L6 后面设置近场监测点 NF34 和远场监测点 FF34，取传输空间滤波器(Vacuum SF2)小孔 5 中心为远场的基准中心，透镜 L6 的中心为近场基准中心。调整反转镜 BM2 和 BM3，使光束准确穿过小孔 3 和小孔 4。

该方案的主要特点是解决了腔镜准直这一棘手难题，可以方便地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 程光路的准直，解决了腔镜后不能取光给准直带来的困难。

3 4 程放大光路自动准直的实验研究

该方案在多程放大实验平台上顺利实现，获得了满意的结果。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，光束近场调整精度优于近场光斑的 ±0.5%，远场调整精度小于 0.3"。为考核光路准直的重复性，我们每隔 30min 作一次准直操作，图 7 给出了连续十次准直的结果(远场指向性)。

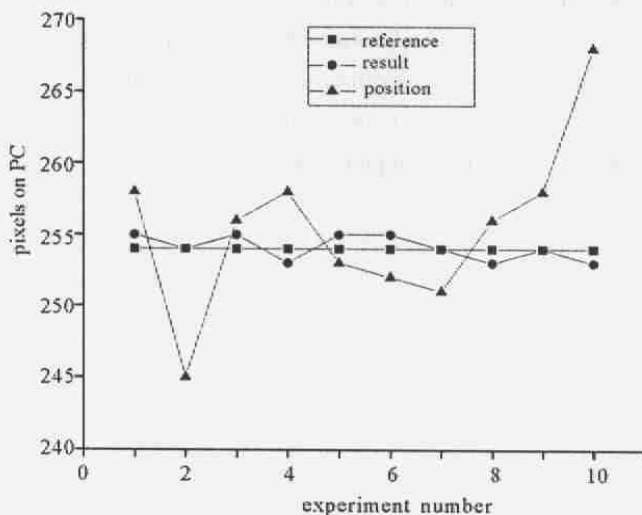


Fig. 7 Experiment results of the far field beam alignment

图 7 光束远场准直实验结果

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，均达到了预定的总体调整要求。

4 结 论

本文充分考虑了 4 程放大结构的主空间滤波器的 4 个小孔空间分布和光学位置的特点，利用像传递原理，设计出一套优化合理的 4 程放大光路自动准直方案，并在多程放大平台上作了实验，得到了满意的实验结果。

致 谢 本文在实验中得到中科院激光聚变研究中心的大力协助，谨此致谢！

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] Boege S J, Bliss E S, Chokol 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.
 [3] 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.
 [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] Peng H S, Zhang X M, Wei X F, et al. Status of the SG-III solid state laser project[A]. Proc of SPIE[C]. 1999, **3492**: 25—33.
- [6] 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
- [7] 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)
- [8] 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.
- [9] Hunt J T, Renard P A, Simmons W W. Improved performance of fusion lasers using the imaging properties of multiple spatial filters[J]. *Appl Opt*, 1977, **16**(4): 779—782.

Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers

LIU Dai-zhong, ZHU Jian-qiang, 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: Laser beam automatic alignment systems are used to align the SG-III prototype facility laser. Considering the facility requirement, combining the key technique of automatic alignment, according to the image relay of the pinhole, utilizing the optical position and the spatial location of the four pinholes of the main spatial filter in the four-pass beam in the SG-III, this paper presents a reasonable scheme for automatic aligning in the four-pass amplifier, which has been fully checked on the multi-pass amplifier experiment system. The centering sensitivities of the system are less than 0.5% of the beam diameter. The pointing sensitivities of the system are less than $10\mu\text{m}$.

Key words: Laser technique; Beams alignment; Four-pass amplifier; Image relaying