

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0351-04

神光 II 激光核聚变装置激光束自动控制系统研究

陈庆灏 徐仁芳 刘代中 刘文字 彭增云 杨惠兵 诸彩龙

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

摘要: 研究了用于 SG-II 装置光束精密瞄准的激光束自动控制系统。用傅里叶光学分析可知,探测激光束位置取于空间滤波器像传递面,这时近远场像面上衍射噪声最小,光束自动调整时,近远场关联又最小,可以各自独立调整。计算机 CCD 图像处理闭环系统实现了光束自动控制。误差分析和 SG-II 全系统光束自动控制实验表明,光束瞄准精度 $< 1''$ 。

关键词 光路准直, 像传递, CCD 图像处理

中图分类号 TN24 文献标识码 A

Experiment Research on the Laser Fusion Facility Beam Automatic Control System

CHEN Qing-hao XU Ren-fang LIU Dai-zhong LIU Wen-yu PENG Zeng-yun

YANG Huibing ZHU Cailong

(State Key Lab of High Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The laser beam automatic control system is applied in the beam collimation of the laser fusion facility of "SG-II". It can be inferred from the optical analysis of Fourier, the image noise of the near and far-field caused by diffraction is the least when the near and far-field which are to detect the location of the laser beams are on the image-relay plane of the spatial filter. When correcting the beams automatically, the correlation of the near and far-field is also the least so that they can be adjusted independently. The image processing makes the automatic alignment realized with the computer and CCD camera. It can be shown from the error analysis and the experiment of automatic alignment of the system that the precision of the beam position is less than $1''$.

Key words beam alignment, image-relay, CCD image processing

1 引 言

神光 II 装置从激光振荡器输出开始,经预放大级,8 束主放大级到靶场,总光路长度有几百米,光束反射镜就有一百余块。这些反射镜控制着激光束的方向和位置,要求光束准确无误地打到靶上,如果由人工调整光束,这是非常繁重而不可能实现的事,因此我们研究了光束自动控制技术,使神光 II 装置光束迅速准确地调到靶上,提高激光打靶精度和打靶效率。

2 光路自动准直原理

2.1 激光束的近远场调整

用两块反射镜调整光束,使光束近场中心通过

两个光路中的基准中心,光束就有精确指向,这就是光路自动准直的原理。光束近远场面和光路基准面的选取必须遵循像传递原则。空间滤波器的特性已有很多研究^[1,2],我们用傅里叶光学分析空间滤波器像传递特性。

空间滤波器结构如图 1 所示。 a 面为前级像传递

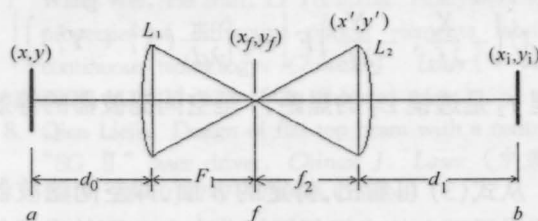


图 1 空间滤波器

Fig. 1 Spatial filter

过来的像平面,作为本级空间滤波器的物面。 a 面距第一块透镜 L_1 距离为 d_0 , 它的光场分布为 $U(x, y)$; 空间滤波器量由一对共焦透镜 L_1 和 L_2 组成, 在共焦面 F 处有一小孔。这里只讨论单色平面波的情况

(大多数空间滤波器情况激光束可以近似这样认为)。设入射光截面 a 的半径为 R 且为平面波并有角移 (f_a, f_b) 和平移 (a, b) , 根据傅里叶光学^[3] 分析可知, 入射面的光场复振幅 $U(x, y)$:

$$U(x, y) = \text{circ}\left[\frac{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2}}{R}\right] \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}(f_a x + f_b y)\right] \quad (1)$$

空间滤波器焦平面 F 处的远场光场分布为:

$$U_f(X_f, Y_f) = \frac{1}{j\lambda f_1} \exp\left[j\frac{k}{2f_1}\left(1 - \frac{d_0}{f_1}\right)(X_f^2 + Y_f^2)\right] F[U(x, y)] \text{circ}\left[\frac{\sqrt{X_f^2 + Y_f^2}}{r_0}\right] =$$

$$\frac{1}{j\lambda f_1} \exp\left[j\frac{k}{2f_1}\left(1 - \frac{d_0}{f_1}\right)(X_f^2 + Y_f^2)\right] \frac{J_1 2\pi \sqrt{(X_f/\lambda f_1 - f_a)^2 + (Y_f/\lambda f_1 - f_b)^2}}{\sqrt{(X_f/\lambda f_1)^2 + (Y_f/\lambda f_1)^2}} \times$$

$$\exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{X_f}{\lambda f_1} a + \frac{Y_f}{\lambda f_1} b\right)\right]$$

这里 f_1 为第一块透镜 L_1 的焦距, d_0 为 a 面到 L_1 的距离, r_0 为小孔直径。从(2)式可以看出, 后焦平面 F 光场分布和傅里叶变换位移定理相一致, 即函数在空域的相移, 导致频谱的位移, 函数在空域中的平移, 带来频域中的线性相移。 F 面的光斑中心平移是由 a 面光束角移引起的。光路自动准直时, 把后焦平面上 F 上小孔成像在 CCD 光敏面上称 F 面光斑是光束远场, CCD 相机探测光束远场的位置, 小孔像的中心就是远场基准。由于 CCD 对幅度探测是灵敏的, 而对位相因子探测则不灵敏, 这样 CCD 位移输出就可认为是 a 面光束角移而与光束的平移无关。

b 光斑的中心平移是 a 面光束平移形成的, 和角移无关。在像面 b 设光阑或取现有光路中参考物作为光路自动准直近场基准, 将它成像在 CCD 光敏面上, CCD 就可以探测光束的平移。

距离透镜 L_2 为 d_1 处取 b 面为光路准直近面探测面。任意 b 面光场复振幅分布 $U_i(x_i, y_i)$ 是很复杂的, 光场强度有起伏变化, 并有衍射噪声。但若 a 面和 b 面之间满足几何成像关系, 即 $1/f_1 + 1/f_2 - d_0/f_1 = d_1^2/f$ 的情况下, b 面的光场复振幅分布有了新的特征:

基于以上分析, 遵循像传递原理近远场探测给光路自动准直带来两个优点。一是像平面上噪声最小, 提高了图像处理的精度, 另一更重要的是把光束近远场调整的相互影响降低到最小, 即可以独立调整光束的近远场。实践证明, 这一特性在光束精密调整中起了非常重要的作用。

$$U_f(X_i, Y_i) = \frac{1}{\lambda^2 f_2 d_1} \exp\left[j\frac{k}{2d_1}(X_i^2 + Y_i^2)\right] \times$$

$$U\left(-\frac{X_i}{\lambda f_2}, -\frac{Y_i}{\lambda f_2}\right) F\left\{\exp\left[\frac{\pi}{\lambda d_1}(X_i^2 + Y_i^2)\right]\right\} \quad (3)$$

这里 f_2 是透镜 L_2 的焦距, f 是空间滤波器的等效焦距。

激光主振荡器光强不够, SG-II 光路自动准直需要在总体光路适当位置插入准直激光光源。这个光源要求波长、偏振和主激光一致, 且和主激光精确同轴。准直激光必须有足够的光强, 能在最后光学位置接受到必要的光强信息。这一光源选择半导体泵浦 Na:YAG 激光器, 它结构紧凑, 单模输出, 光强可调, 光束稳定, 是理想的准直光源。

2.2 CCD 图像处理闭环系统

光路自动准直是个闭环系统, CCD 近远场探测光束位置, 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, 求出实时图像中心和标准中心的误差信号 $\Delta x, \Delta y$ 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, CCD 图像处理闭环系统如图 2 所示。

从式(3)可看出, 特定的 b 面, 即空间滤波器的像传递平面上的光场复振幅分布和 a 面的光场复振幅分布成正比。式中的最后一项是虚函数的傅里叶变换还是虚函数, 它不影响强度分布。因此传递像面

CCD 图像处理如图 3 所示, (a) 为原始图像图, (b) 为二值法去噪声图, (c) 为中值法去孤立点图, (d) 为去边缘图, (e) 为求图像中心图。

由于光路中有空间滤波器小孔存在, 限制了远

场 CCD 的视场。光束近远场联调过程中采取逐步逼近的方法调整,使光束不走到小孔外面去,确保完成一条光束的连续调整。两块反射镜近远场调整完

光束后,计算机自动转换调整下一光束,直到最后一光束调整完毕。

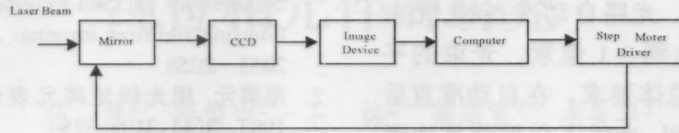


图 2 CCD 图像处理闭环系统

Fig. 2 CCD image processing of the closed loop system

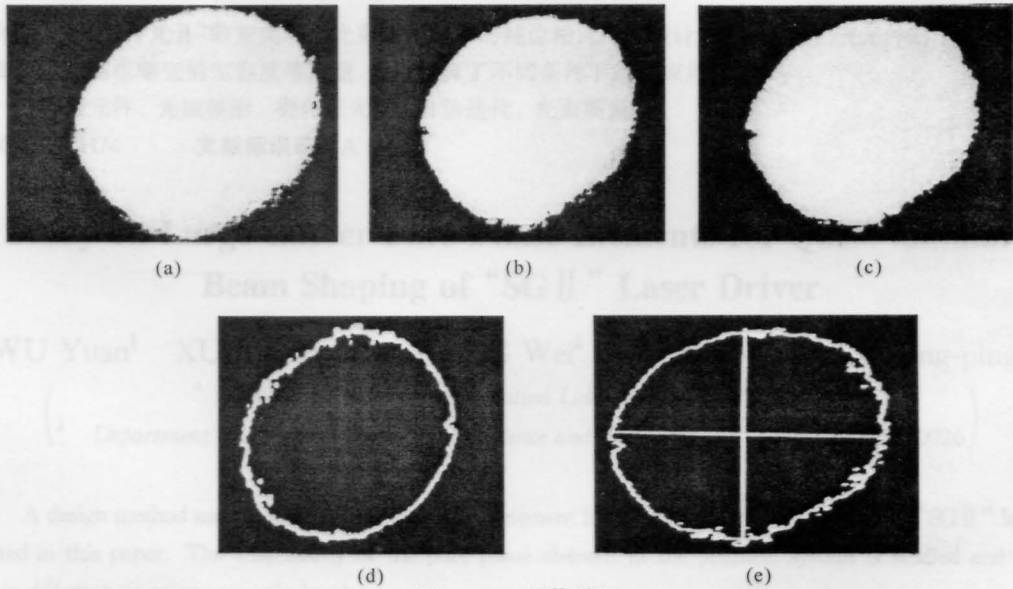


图 3 CCD 图像处理

Fig. 3 CCD image processing

3 光束瞄准精度分析

光路自动准直的光束瞄准精度包括平移精度和角移精度。前端光束要求平移精度小于 0.0116 mm,角移精度小于 125"。在靶镜光束平移量小于 6.25 mm,角瞄准精度 < 1"。

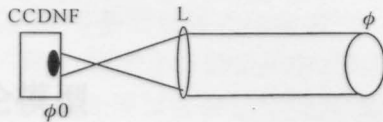


图 4 光束近场探测

Fig. 4 Near field detection of the laser beam

光束近场探测如图 4 所示。设光路中某一近场参考物 ϕ , 经物镜 L 成像在 CCDNF 光敏面上, 像为 ϕ_0 。像的放大倍数为 β , 则

$$\phi = \beta\phi_0 \quad (4)$$

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta\phi_0}{\phi_0} \quad (5)$$

$$\Delta\phi = \phi \frac{\Delta\phi_0}{\phi_0} \quad (6)$$

光学系统把物 ϕ 放大成像, 它的尺寸 $\phi_0 = 3 \text{ mm}$, CCD 每个像素为 $15 \mu\text{m}$, 根据(5)式光束直径的探测精度为 0.5%。根据(6)式可知前端光束直径 2 mm, 光束近场探测和调整精度为 0.01 mm。靶镜前光束直径 250 mm, 光束近场探测和调整精度根据(6)式可知为 1.25 mm, 所以光束在前端和束端平移量是可以满足总体要求的。

光束远场探测如图 5 所示。光束经远场物镜成像, 再由放大物镜放大 M 倍后成像在 CCDFF 上。设光束有角移 δ , 物镜焦距为 f , 在 CCDFF 放大了



图 5 光束远场探测

Fig. 5 Far field detection of the laser beam

